



**Ana Rute Carvalho dos Santos Ferreira**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

## **Estudo de Soluções de Otimização para Edifícios de Balanço Energético Nulo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL  
Co-orientador: Doutora Laura Aelenei, LNEG

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente:	Doutor Helder Gonçalves
Vogais:	Prof. Doutor Daniel Aelenei Doutora Laura Elena Aelenei



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2012**



**Ana Rute Carvalho dos Santos Ferreira**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

## **Estudo de Soluções de Otimização para Edifícios de Balanço Energético Nulo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL  
Co-orientador: Doutora Laura Aelenei, LNEG

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente:	Doutor Helder Gonçalves
Vogais:	Prof. Doutor Daniel Aelenei Doutora Laura Elena Aelenei



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2012**



‘Copyright’ Ana Rute Carvalho dos Santos Ferreira, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgá-la através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Doutor Daniel Aelenei, pois foi através dele que todo o meu interesse nesta temática foi despertado e aprimorado.

Quero também agradecer à minha co-orientadora, a Doutora Laura Aelenei, pelo tempo que me dedicou.

Mas não só de explicações e orientações esta dissertação foi escrita. Assim, quero também agradecer aos meus pais, irmãos e amigos que me ajudaram a suportar todas as adversidades que surgiram.





## Resumo

Os edifícios de balanço energético nulo e/ou quase nulo têm recebido uma atenção crescente desde a publicação da nova Diretiva sobre o Desempenho Energético dos Edifícios. A nova EPBD obriga que todos os edifícios a construir a partir de 2020, ou grandes remodelações, sejam caracterizados por um balanço energético quase nulo.

Esta dissertação de mestrado tem por base dois objetivos, i) procurar possíveis formas de otimização energética dos edifícios residenciais com recurso a ferramentas de simulação e ii) obter conclusões sobre a viabilidade da metodologia utilizada em i).

A metodologia de trabalho é dividida em três partes: a) estudo energético de uma moradia de referência unifamiliar em regime dinâmico com recurso à ferramenta de simulação *EnergyPlus*, b) estudo de otimização de parâmetros que condicionam o comportamento energético com recurso à utilização de algoritmos de otimização multi-dimensional, mais propriamente aos algoritmos de *Generalized Pattern Search* (GPS), implementado-os através da ferramenta *GenOpt* e c) análise de sensibilidade realizada com a ferramenta *GenOpt* tendo em conta as zonas climáticas representativas de Portugal Continental.

Na sequência das simulações realizadas concluiu-se que o estudo realizado com recurso a ferramentas de simulação e de otimização conduz a uma diminuição considerável das necessidades energéticas, especialmente em relação às necessidades de aquecimento.

### Palavras-Chave:

Balanço energético nulo, Eficiência Energética, *EnergyPlus*, *GenOpt*, Otimização, Simulação



## Abstract

Net zero or nearly zero energy buildings have received increasing attention since the publication of the new Directive on the Energy Performance of Building. The EPBD recast requires that all new buildings or major refurbishment to be “nearly-zero” energy building (*nZEB*) by 2020.

This dissertation objectives are twofold: i) searching for possible forms of energy optimization in residential buildings with the auxiliary of computer programs and ii) obtaining conclusions about the feasibility of the methodology used in i).

The methodology used to achieve objective i) is divided into three parts: a) energy study of single-family reference dwelling using the tool *EnergyPlus*, b) study the optimization of parameters that influence the energy behavior using multi-dimensional optimization algorithms, namely the Generalized Pattern Search algorithms (GPS), implemented through the tool *GenOpt* and c) sensitivity analysis performed with the tool *GenOpt* taking into account the climatic zones representative Continental Portugal.

Following the simulations it was concluded that a well designed optimization study performed using the simulation tools may lead to a considerable reduction of energy needs, especially in relation to heating needs.

### Key Terms:

Net zero-energy balance, Energy Efficiency, EnergyPlus, GenOpt, Simulation, Optimization



# Índice

<b>CAPÍTULO 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Estrutura do trabalho .....	2
<b>CAPÍTULO 2 - Estado do Conhecimento .....</b>	<b>3</b>
2.1 Considerações iniciais .....	3
2.2 Edifícios energeticamente eficientes .....	3
2.2.1 Edifícios de Baixo Consumo Energético.....	4
2.2.2 Casas Passivas .....	5
2.2.3 Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Carbono Zero .....	6
2.3 Conceito de Edifícios de Balanço Energético Nulo .....	9
2.4 Implementação do conceito nZEB na Europa .....	11
2.4.1 Norma <i>Passivhaus</i> .....	11
2.4.2 Projecto <i>Passive-On</i> .....	11
2.4.3 Diretiva da Performance Energética dos Edifícios ( <i>Energy Performance of Buildings Directive</i> – EPBD).....	12
2.4.4 Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo ( <i>Principles for Nearly Zero-Energy Buildings</i> ) .....	13
2.5 Concretização de um Edifício de Balanço Energético Nulo .....	15
<b>CAPÍTULO 3 - Metodologia de Estudo .....</b>	<b>17</b>
3.1 Considerações iniciais .....	17
3.2 Metodologia.....	17
3.3 Ferramentas de simulação utilizadas .....	18
3.3.1 <i>EnergyPlus</i> .....	18
3.3.2 <i>GenOpt</i> .....	19
3.4 Caso de Estudo .....	25
3.4.1 Soluções construtivas adotadas .....	27
3.4.2 Aplicação do RCCTE.....	28
3.4.3 Aplicação do <i>EnergyPlus</i> .....	29
3.4.4 Necessidades energéticas da moradia de referência (Valores Iniciais) .....	31
<b>CAPÍTULO 4 - Estudo de Otimização .....</b>	<b>35</b>
4.1 Considerações iniciais .....	35
4.2 1ª Fase - Estudo prévio de soluções construtivas .....	36

4.2.1	Paredes Exteriores .....	36
4.2.2	Coberturas .....	40
4.2.3	Pavimentos .....	43
4.2.4	Envidraçados .....	44
4.2.5	Soluções construtivas otimizadas combinadas .....	49
4.3	2ª Fase – Otimização com recurso ao <i>GenOpt</i> .....	51
4.3.1	Variáveis estudadas .....	51
4.3.2	Pressupostos de utilização do <i>GenOpt</i> .....	54
4.3.3	Necessidades energéticas – Resultados do estudo de otimização .....	56
4.4	3ª Fase - Análise dos resultados .....	64
4.4.1	Fase A - Análise geral dos resultados obtidos para cada variável .....	64
4.4.2	Fase B - Análise das necessidades energéticas, construção e análise dos gráficos de balanço energético nulo.....	67
<b>CAPÍTULO 5 - Considerações Finais.....</b>		<b>79</b>
5.1	Considerações finais.....	79
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	79
<b>Bibliografia .....</b>		<b>81</b>
<b>Anexo I .....</b>		<b>85</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Casa projetada com conceito de desenho passivo. (Renovables Verdes, 2011) .....	3
Figura 2.2 – Evolução dos edifícios de acordo com a sua relação necessidades/produção.....	4
Figura 2.3 – a) Edifício PREV, b) Fotografia aérea do edifício PREV (Parker, 2009).....	5
Figura 2.4 – Fotografia do Edifício Energon, Ulm, Alemanha (EnOB, 2012). ....	5
Figura 2.5 – Edifício Blaue Heimat, Alemanha (Herkel, 2010).....	6
Figura 2.6 – a) fotografia (Aelenei, L. <i>et al.</i> , 2012), b) desenho computadorizado (Kingspan: Lighthouse, 2012) e c) esboço do Edifício Lighthouse (Kingspan: Lighthouse, 2012).....	7
Figura 2.7 – Fotografia da fachada sul do Edifício Solar XXI (Gonçalves <i>et al.</i> , 2012). ....	7
Figura 2.8 – Produzido (Y) $\simeq$ Consumido (X). Imagem ilustrativa do conceito <i>nZEB</i> .....	10
Figura 2.9 – Diagrama dos Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (Atanasiu, 2011).....	14
Figura 3.1 – Diagrama da metodologia do estudo realizado. ....	17
Figura 3.2 – Diagrama do funcionamento do programa <i>EnergyPlus</i> . ....	18
Figura 3.3 – Diagrama do funcionamento do programa <i>GenOpt</i> , retirado do seu manual de utilização (Wetter, 2011). ....	21
Figura 3.4 – Diagrama que demonstra o funcionamento da ligação entre o <i>GenOpt</i> e a sua base de dados de algoritmos (Wetter, 2011). ....	22
Figura 3.5 – Diagrama do funcionamento do algoritmo de Hooke-Jeeves. ....	25
Figura 3.6 – Desenho 3D da moradia de referência. ....	26
Figura 4.1 – Diagrama das fases a decorrer na otimização. ....	35
Figura 4.2 – Diagrama de possíveis tipos de paredes a aplicar. ....	36
Figura 4.3 – Diagrama de possíveis tipos de coberturas a aplicar.....	41
Figura 4.4 - Diagrama de possíveis tipos de envidraçados a aplicar.....	44
Figura 4.5 – Diagrama de relação entre as necessidades de aquecimento e arrefecimento com as variáveis complexas estudadas através do <i>GenOpt</i> . ....	51
Figura 4.6 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Bragança. ....	57
Figura 4.7 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Évora.....	59
Figura 4.8 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Faro.....	60
Figura 4.9 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Lisboa. ....	61
Figura 4.10 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Porto. ....	63
Figura 4.11 – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Bragança com as necessidades energéticas totais. ....	68
Figura 4.12 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Bragança em energia primária. ....	69
Figura 4.13 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Bragança em energia final.....	69
Figura 4.14 – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Évora. ....	70
Figura 4.15 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Évora em energia primária. ....	71
Figura 4.16 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Évora em energia final. ....	71
Figura 4.17 – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Faro. ....	72
Figura 4.18 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Faro em energia primária. ....	73

Figura 4.19 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Faro em energia final. ....	73
Figura 4.20 – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Lisboa. ....	74
Figura 4.21 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Lisboa em energia primária. ....	75
Figura 4.22 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Lisboa em energia final. ....	75
Figura 4.23 – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Porto. ....	76
Figura 4.24 - Gráfico de balanço energético para a cidade do Porto em energia primária. ....	77
Figura 4.25 - Gráfico de balanço energético para a cidade de Porto em energia final. ....	77



## Índice de Tabelas

Quadro 2.1 – Descrição sumária das características do Edifício Solar XXI. ....	8
Quadro 2.2 – Vantagens e desvantagens das definições dos <i>nZEB</i> por Torcellini <i>et al.</i> .....	10
Quadro 3.1 – Dados climáticos por cidade.....	26
Quadro 3.2 – Soluções construtivas adotadas e respectivos valores de U.....	27
Quadro 3.3 – Pressupostos assumidos na simulação da moradia de referência com o <i>EnergyPlus</i> . ....	30
Quadro 3.4 – Fatores de conversão de energia útil em energia primária .....	31
Quadro 3.5 – Valores das necessidades para a cidade de Bragança, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o <i>EnergyPlus</i> , as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica. ....	32
Quadro 3.6 - Valores das necessidades para a cidade de Évora, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o <i>EnergyPlus</i> , as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica. ....	32
Quadro 3.7 - Valores das necessidades para a cidade de Faro, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o <i>EnergyPlus</i> , as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica. ....	33
Quadro 3.8 - Valores das necessidades para a cidade de Lisboa, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o <i>EnergyPlus</i> , as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica. ....	33
Quadro 3.9 - Valores das necessidades para a cidade do Porto, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o <i>EnergyPlus</i> , as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica. ....	33
Quadro 4.1 – Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica. ....	37
Quadro 4.2 – Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.....	37
Quadro 4.3 – Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	37
Quadro 4.4 - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.....	38
Quadro 4.5 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	38
Quadro 4.6 - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.....	38
Quadro 4.7 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	39
Quadro 4.8 - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.....	39
Quadro 4.9 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	39
Quadro 4.10 - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.....	40
Quadro 4.11 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	40
Quadro 4.12 – Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica. ....	40

Quadro 4.13 - Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas. ....	41
Quadro 4.14 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	41
Quadro 4.15 - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas. ....	41
Quadro 4.16 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	42
Quadro 4.17 - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas. ....	42
Quadro 4.18 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	42
Quadro 4.19 - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas. ....	42
Quadro 4.20 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	43
Quadro 4.21 - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas. ....	43
Quadro 4.22 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	43
Quadro 4.23 - Necessidades de cada cidade com a envolvente opaca, pavimento, alterado. ....	44
Quadro 4.24 - Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica. ....	44
Quadro 4.25 - Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com os envidraçados alterados. ....	45
Quadro 4.26 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	45
Quadro 4.27 - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com os envidraçados alterados. ....	46
Quadro 4.28 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	46
Quadro 4.29 - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com os envidraçados alterados. ....	47
Quadro 4.30 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	47
Quadro 4.31 - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com os envidraçados alterados. ....	47
Quadro 4.32 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	48
Quadro 4.33 - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva. ....	48
Quadro 4.34 - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com os envidraçados alterados. ....	49
Quadro 4.35 – Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Bragança e respetiva variação. ....	49
Quadro 4.36 - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Évora e respetiva variação. ....	49
Quadro 4.37 - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Faro e respetiva variação. ....	50

Quadro 4.38 - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Lisboa e respetiva variação. ....	50
Quadro 4.39 - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade do Porto e respetiva variação. ....	50
Quadro 4.40 - Discretização das variáveis complexas estudadas.....	52
Quadro 4.41 – Conjunto de variáveis, respetivas siglas e intervalo de variação.....	55
Quadro 4.42 – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”. ....	57
Quadro 4.43 – Resultados para cada variável estudada.....	58
Quadro 4.44 – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Bragança e respetiva variação nominal e percentual.....	58
Quadro 4.45 – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”. ....	58
Quadro 4.46 – Resultados para cada variável estudada.....	59
Quadro 4.47– Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Évora e respetiva variação nominal e percentual. ....	59
Quadro 4.48 – Resultados para cada variável estudada.....	60
Quadro 4.49 – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”. ....	61
Quadro 4.50 – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Faro e respetiva variação nominal e percentual.....	61
Quadro 4.51 – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”. ....	62
Quadro 4.52 – Resultados para cada variável estudada.....	62
Quadro 4.53 – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Lisboa e respetiva variação nominal e percentual. ....	62
Quadro 4.54 – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”. ....	62
Quadro 4.55 – Resultados para cada variável estudada.....	63
Quadro 4.56 – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade do Porto e respetiva variação nominal e percentual. ....	64
Quadro 4.57 – Quadro comparativo dos desenhos tridimensionais da moradia de referência, antes e após o estudo. ....	66
Quadro 4.58 – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Bragança e da energia solar mínimo regulamentar. ....	68
Quadro 4.59 – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Évora e da energia solar mínimo regulamentar.....	70
Quadro 4.60 – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Faro e da energia solar mínimo regulamentar.....	72
Quadro 4.61 – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Lisboa e da energia solar mínimo regulamentar.....	74
Quadro 4.62 – Quadro síntese das necessidades totais da cidade do Porto e da energia solar mínimo regulamentar.....	76
Quadro AI.1 – Resultados das simulações realizadas através do <i>GenOpt</i> . ....	87
Quadro AI.2 – Resultados das simulações realizadas através do <i>GenOpt</i> . ....	89
Quadro AI.3 – Resultados das simulações realizadas através do <i>GenOpt</i> . ....	91
Quadro AI.4 – Resultados das simulações realizadas através do <i>GenOpt</i> . ....	93
Quadro AI. 5 – Resultados das simulações realizadas através do <i>GenOpt</i> . ....	95



## Lista de Abreviaturas e Símbolos

### SIGLAS

ADENE – Agência para a Energia

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning*

AQS – Águas Quentes Sanitárias

BIPV-T – *Building Integrated Photovoltaics and Thermal*

BPIE – *Building Performance Institute of Europe*

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EIA – *Energy Information Administration*

EN – Norma Europeia

EnOB – *Research for Energy Optimization of Building*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

GPS – *Generalized Pattern Search Algorithm*

HVAC – *Heating, Ventilation and Air-Conditioning*

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

NP – Norma Portuguesa

NT – Nota Técnica

*nZEB – net Zero-Energy Buildings*

RCCTE – Regulamento do Comportamento das Características Térmicas dos Edifícios

REGEU – Regulamento Geral das Edificações Urbanas

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e de Qualidade do Ar Interior dos Edifícios

TARP – *Thermal Analysis Research Program*

UNL – Universidade Nova de Lisboa

US – *United States*

UE – União Europeia

ZEB – *Zero-Energy Buildings*

## **NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS**

$A_p$  – Área Útil de Pavimento ( $m^2$ )

GD – Graus-Dias de Aquecimento ( $^{\circ}C.dias$ )

$U$  – Coeficiente de Transmissão Térmica ( $W/m^2.^{\circ}C$ )

$R_{ph}$  – Renovações por Hora ( $h^{-1}$ )

$X()$  – Fator de Orientação (-)

$g_{\perp}$  – Fator Solar do Vão Envidraçado (-)

$F_h$  – Fator de Sombreamento do Horizonte (-)

$F_o$  – Fator de Sombreamento por Elementos Horizontais Sobrepostos ao Vão Envidraçado (-)

$F_f$  – Fator de Sombreamento por Elementos Verticais Adjacentes ou Sobrepostos ao Vão Envidraçado (-)

$F_s$  – Fator Solar (-)

$F_g$  – Fração Envidraçada (-)

$F_w$  – Fator de Correção da Selectividade Angular dos Envidraçados (-)

$N_a$  – Necessidade de Produção de AQS em Energia Primária ( $kWh/m^2.a$ )

$N_{ac}$  – Necessidade de Produção de AQS em Energia Primária Calculadas ( $kWh/m^2.a$ )

$N_i$  – Necessidade de Aquecimento em Energia Primária ( $kWh/m^2.a$ )

$N_{ic}$  – Necessidade de Aquecimento em Energia Primária Calculadas ( $kWh/m^2.a$ )

$N_v$  – Necessidade de Arrefecimento em Energia Primária ( $kWh/m^2.a$ )

$N_{vc}$  – Necessidade de Arrefecimento em Energia Primária Calculadas ( $kWh/m^2.a$ )

$N_t$  – Necessidade Globais em energia primária ( $kWh/m^2.a$ )

$N_{tc}$  – Necessidade Globais em energia primária calculadas ( $kWh/m^2.a$ )

$F_{pua}$  – Fator de Conversão de Energia Útil em Energia Primária para as Necessidades de Produção de AQS ( $kWh/kWh$ )

$F_{\text{pui}}$  – Fator de Conversão de Energia Útil em Energia Primária para as Necessidades de Aquecimento (kWh/kWh)

$F_{\text{puv}}$  – Fator de Conversão de Energia Útil em Energia Primária para as Necessidades de Arrefecimento (kWh/kWh)

### **NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS**

$\alpha$  – Ângulo do Horizonte (°)

$\eta_a$  – Eficiência de Conversão dos Sistemas de Preparação de AQS (-)

$\eta_i$  – Eficiência Nominal dos Equipamentos para Aquecimento (-)

$\eta_v$  – Eficiência Nominal dos Equipamentos para Arrefecimento (-)





# CAPÍTULO 1 - Introdução

## 1.1 Motivação e enquadramento do tema

Até ao início da década de 70 a energia era vendida ao desbarato, com a ideia subjacente de que as reservas petrolíferas não teriam fim. Assim, a consciência mundial moldou-se nesta ideia e permitiu um elevado consumo energético feito a todos os níveis. Com as crises energéticas da década de 70 surge a consciência da escassez deste tipo de recursos naturais, criando-se assim a necessidade de alternativas ao petróleo, carvão e gás natural. (Moita, 1987).

Segundo o International Energy Outlook (Conti e Holtber, 2011), estudo estatístico dos consumos energéticos a nível mundial, populacional e regional levado a cabo pela agência E.I.A., U.S. Energy Information Administration, os combustíveis líquidos, derivados do petróleo, continuam a ser os mais consumidos na produção energética, seguidos pelo carvão, gás natural, fontes renováveis e produtos nucleares. Esta informação, juntamente com o facto de que a utilização de combustíveis fósseis produzem elevadas emissões de dióxido de carbono e outros componentes poluentes e que as reservas conhecidas estão a chegar ao fim, originou preocupações quanto ao consumo energético feito pela população mundial.

Em Portugal cerca de 30% do consumo global deve-se ao parque edificado. Este valor é inferior à média europeia, que se situa no patamar dos 40%. O consumo feito pelo sector residencial representa 60% do consumo elétrico total do país. Depreende-se assim que um dos sectores que deve modificar os seus hábitos de consumo energético é o residencial, tanto a nível nacional como mundial (Gonçalves, 2010).

Dado que o consumo energético dos edifícios tem um grande peso no quadro geral, é importante estudar as causas que estão na sua base para identificar formas de o diminuir. Foi nessa sequência que surgiu a reformulação da Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD recast, 2010), que agrupa um conjunto de medidas que devem ser tomadas pelos Estados Membros, de forma a atingir-se, entre outros objetivos o de balanço energético nulo em todos os edifícios a construir (residenciais ou não, públicos ou privados) a partir de 2020.

A presente dissertação surge na sequência das preocupações manifestadas pelo Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para com as metas apontadas pela EPBD *recast*, procurando estudar as possíveis formas de otimização do desempenho energético de edifícios de habitação unifamiliares através da promoção da diminuição dos seus consumos, procurando obter uma performance do tipo balanço energético nulo.

## 1.2 Objetivos

A realização desta dissertação de mestrado tem em vista dois objetivos. O primeiro objetivo consiste na procura, para cada zona representativa de Portugal, de formas de otimização das soluções construtivas da, dimensão dos envidraçados, da orientação, dos sombreamentos e renovações horárias de um edifício unifamiliar para necessidades energéticas mínimas. O segundo objetivo consiste na análise dos resultados obtidos no primeiro de forma a obter conclusões relativas ao enquadramento na categoria dos edifícios de balanço energético nulo.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação de mestrado encontra-se dividida em cinco capítulos, que serão descritos de seguida.

O primeiro capítulo, a Introdução, faz o enquadramento do tema, da motivação, neste explica-se quais os objetivos a alcançar e qual a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado ao estado do conhecimento, que analisa os conceitos associados aos edifícios de balanço energético nulo, *net Zero-energy Buildings (nZEB)*, as suas implicações e as medidas alcançadas e futuramente tomadas para o seu alcance.

O terceiro capítulo, Caso de Estudo, começa pela descrição das ferramentas de simulação utilizadas, à qual se segue a exposição da moradia e das soluções construtivas associadas. No terceiro capítulo são também descritos os pressupostos considerados para a verificação dos requisitos de conforto higrotérmico impostos pela legislação vigente e a análise das necessidades energéticas.

O quarto capítulo, Estudo da Otimização, tem como intuito identificar as possíveis formas de otimização do comportamento térmico do edifício (moradia de referência) e expor as respetivas conclusões relativas às otimizações. Fazem-se comparações e a análise dos valores obtidos no terceiro capítulo com os valores ótimos do quarto capítulo.

O quinto capítulo, Considerações Finais, expõe as conclusões obtidas na sequência do trabalho realizado nesta dissertação de mestrado, abordando igualmente os possíveis desenvolvimentos futuros.

# CAPÍTULO 2 - Estado do Conhecimento

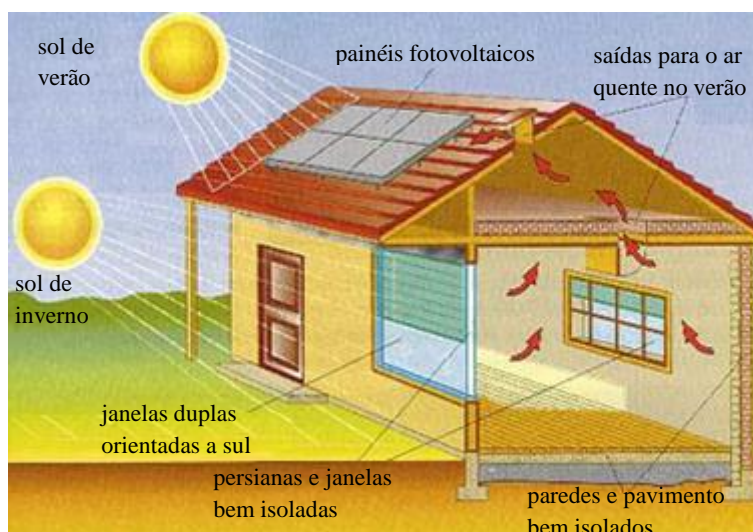
## 2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será introduzido o conceito de Edifícios de Balanço Energético Nulo (*net Zero-energy Building – nZEB's*), abordando no âmbito do presente estudo os progressos existentes no domínio da eficiência energética associada aos edifícios bem como as tendências futuras.

## 2.2 Edifícios energeticamente eficientes

Como o sector dos edifícios é um dos sectores que mais energia consome, é necessário identificar e estudar as possíveis estratégias e medidas que permitam a conceção ou a reabilitação dos edifícios por forma a que sejam termicamente eficientes, proporcionando aos seus ocupantes as melhores condições de conforto com necessidades energéticas mínimas.

A conceção de um edifício energeticamente eficiente baseia-se no conceito de desenho passivo. Neste faz-se o controlo ambiental através da manipulação de componentes passivos, tais como: a forma do edifício, a disposição das aberturas e o desempenho térmico dos materiais aplicados. O desenho passivo puro não deveria ter no seu projeto sistemas ativos, mas muitas vezes deixar de fora essa componente é inviável. (Passive-on Project, 2007). A Figura 2.1 mostra um exemplo de aplicação do conceito de desenho passivo num edifício.



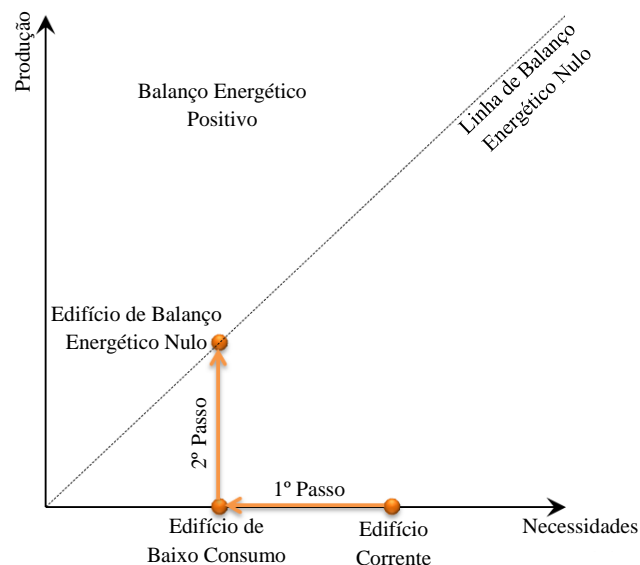
**Figura 2.1** – Casa projetada com conceito de desenho passivo. (Renovables Verdes, 2011)

Os regulamentos e normas atuais apenas impõem um limite mínimo de eficiência energética, deixando em aberto o limite máximo, o que permite que se tente sempre atingir os melhores resultados possíveis. Verifica-se que ainda não existe a preocupação de que os novos edifícios atinjam a eficiência energética máxima possível, mas sim garantir os mínimos exigidos.

Apesar disso, existe um conjunto largo de conceitos, alguns dos quais se baseiam em normas de aplicação voluntária (sem qualquer vínculo específico à legislação), elaboradas com o objetivo de alcançar valores de performance energética estado de arte. Exemplos de conceitos:

- **Edifícios de Baixo Consumo Energético** (*Low Energy Buildings*);
- **Casas Passivas** (*Passive Houses*);
- **Edifícios de Balanço Energético Nulo e Carbono Zero** (*Zero-energy Buildings and/or Zero Carbon Buildings*).

De acordo com Aelenei *et al.* (2012) os edifícios do tipo Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Carbono Zero podem ser considerados uma evolução dos edifícios do tipo Edifícios de Baixo Consumo Energético e/ou Casas Passivas. De um modo geral, o desempenho energético dos edifícios pode ser compreendido utilizando a ilustração da Figura 2.2. onde se verifica a afirmação anterior.



**Figura 2.2** – Evolução dos edifícios de acordo com a sua relação necessidades/produção.

### 2.2.1 Edifícios de Baixo Consumo Energético

Não existe uma definição global para o baixo consumo de energia de edifícios, mas geralmente indica um edifício que tem um desempenho melhor do que os edifícios correntes. São edifícios que usualmente utilizam elevados níveis de isolamento, janelas eficientes, baixos níveis de infiltração de ar e ventilação com recuperação de calor, garantindo assim a redução das necessidades de aquecimento (European Commission, 2009).

Em 1998, na cidade de Lakeland, Florida, foram construídos dois edifícios de estrutura e características iguais, em que apenas diferiam algumas técnicas de construção. Um dos edifícios foi construído seguindo os parâmetros convencionais, servindo assim de edifício de referência, e o outro foi construído com o intuito de obter um edifício do tipo Edifício de Baixo Consumo Energético, sendo o último designado por PVRES (Parker, 2009). O Edifício PVRES tem: 1) sistema de circulação de ar no interior das paredes, que é alimentado por uma bomba de calor de alta eficiência, 2) paredes com características térmicas melhoradas, 3) cobertura refletiva, 4) painéis fotovoltaicos e 5) sistema solar térmico, sendo que 6) os equipamentos e sistemas de iluminação utilizados têm uma eficiência alta. Na Figura 2.3 pode-se ver uma fotografia do edifício PRVES e a sua localização através de uma fotografia aérea.



**Figura 2.3** – a) Edifício PREV, b) Fotografia aérea do edifício PREV (Parker, 2009).

### 2.2.2 Casas Passivas

A definição de Casa Passiva não é comum em toda a Europa, o termo difere entre a Europa do norte e central do da Europa do sul. No sul da Europa, uma Casa Passiva trata-se de um edifício construído de acordo com o desenho passivo, na Europa do norte e central, a Casa Passiva refere-se a edifícios associados à norma alemã *Passivhaus* (European Commission, 2009).

A *Passivhaus* refere-se a um rigoroso padrão, tomado voluntariamente pelos donos ou construtores de casas, para que estas tenham um elevado grau de eficiência energética e com uma pegada ecológica reduzida, obtendo-se assim um edifício de baixíssimo consumo energético para a manutenção do conforto térmico interior. A norma surge em 1995 com base em experiências reais de casas alemãs, sendo que tem como fundamentos os seguintes pontos: 1) existência de limite energético; 2) existência de requisito de qualidade e 3) aplicação de um conjunto definido de sistemas passivos que possibilitam cumprir o limite energético imposto e o requisito de qualidade, sem esquecer a viabilidade económica (Passive-on Project, 2007).



**Figura 2.4** – Fotografia do Edifício Energon, Ulm, Alemanha (EnOB, 2012).

O edifício é concebido de forma a conseguir obter conforto térmico através do aquecimento ou do arrefecimento de massa de ar fresco, sem a necessidade de um sistema de aquecimento convencional. Usualmente as técnicas construtivas empregues englobam: proveito dos ganhos solares, utilização de

janelas com baixos coeficientes de transmissão térmica ( $U = 0,75 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ), envolventes bastante herméticas e eliminação das pontes térmicas (European Commission, 2009).

O Edifício Energon construído em 2002 em Ulm (Alemanha) foi projetado para ser um edifício do tipo Casa Passiva. Trata-se de um edifício de escritórios e já é referido como um exemplo de construção de edifícios passivos pela União Europeia. Na Figura 2.4 pode ver-se uma fotografia deste. As técnicas e sistemas implementados na sua conceção foram: 1) colocação de tubagem de ventilação que permitem uma ventilação regular do edifício, com ar aquecido ou arrefecido, garantindo a temperatura desejada, 2) fundação com grande nível de isolamento, 3) fachadas e cobertura termicamente isolados, 4) colocação de vidros triplos e 5) implementação de sistema de painéis fotovoltaicos (European Commission, 2009).

### 2.2.3 Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Carbono Zero

Os edifícios energeticamente eficientes do tipo Edifícios de Balanço Energético Nulo ou Carbono Zero são edifícios em que o balanço energético é nulo graças à perfeita conjugação entre consumos energéticos (normalmente baixos) e produção energética eficiente, através de fontes renováveis ou fontes energéticas livres de carbono (European Commission, 2009).

O Edifício Blaue Heimat localizado na cidade alemã Freiburg, construído em 1951 e remodelado em 2005, representa um dos exemplos de Edifícios de Balanço Energético Nulo. Na Figura 2.5 pode ver-se uma fotografia deste (Aelenei, L. *et al.*, 2011).

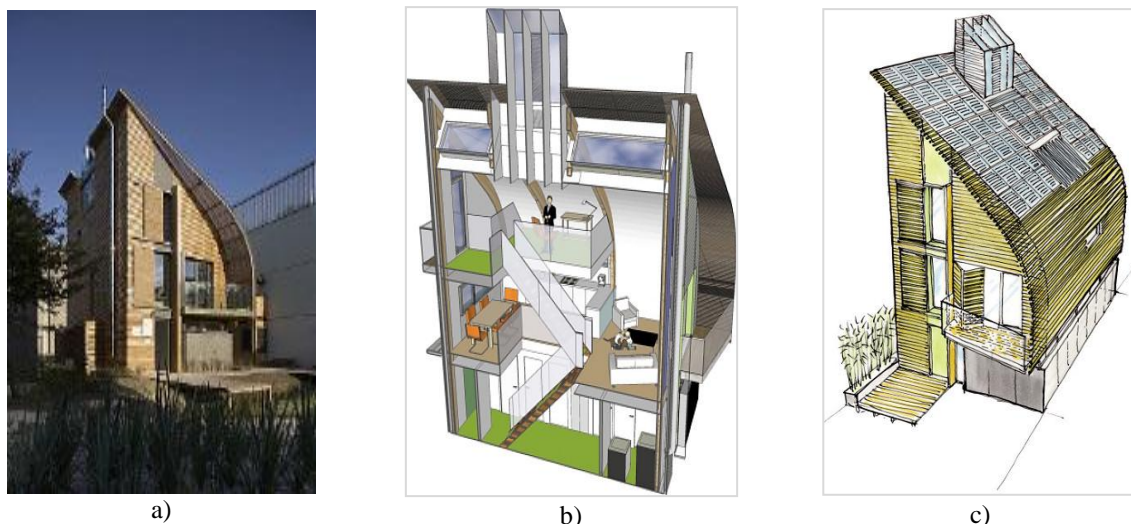


**Figura 2.5** – Edifício Blaue Heimat, Alemanha (Herkel, 2010).

As medidas tomadas durante a remodelação, que permitiram ao edifício enquadrar-se no conceito de Edifícios de Balanço Energético Nulo, basearam-se: 1) no aumento do nível de isolamento térmico das paredes exteriores, cobertura e laje de soleira, 2) aplicação de janelas triplas, 3) sistema de recuperação de calor e 4) colocação de sombreamentos (Herkel, 2010 e Aelenei *et al.*, 2011).

O Edifício Lighthouse enquadra-se no conceito de Edifícios Zero Carbono, este foi o primeiro a ser erigido em Inglaterra com classificação de nível 6 no código inglês para casas sustentáveis, Code for Sustainable Homes (Department for Communities and Local Government, 2009). Na Figura 2.6 pode observar-se o aspeto do Edifício Lighthouse.





**Figura 2.6** – a) fotografia (Aelenei, L. *et al.*, 2012), b) desenho computadorizado (Kingspan: Lighthouse, 2012) e c) esboço do Edifício Lighthouse (Kingspan: Lighthouse, 2012)

As técnicas aplicadas no Edifício Lighthouse foram: 1) elevado nível de isolamento térmico, 2) aproveitamento dos ganhos solares, 3) colocação sombreamentos, 4) sistema de arrefecimento noturno, 5) utilização de equipamentos e luzes eficientes, 6) controlo das cargas térmicas e 7) aproveitamento da luz solar (Aelenei *et al.*, 2012).

Em Portugal já existem exemplos de edifícios em que o conceito de Edifícios de Balanço Energético Nulo esteja aplicado, sendo o Edifício Solar XXI (Figura 2.7), construído em 2006, um deles. Este foi erigido no Campus do Lumiar do LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), não só com o intuito de criar um novo espaço de trabalho aos investigadores, mas também como demonstração da conceção de um edifício *nZEB*, mostrando a conjugação possível do desenho passivo com a utilização de sistemas ativos (Aelenei *et al.*, 2010 e Gonçalves *et al.*, 2012).



**Figura 2.7** – Fotografia da fachada sul do Edifício Solar XXI (Gonçalves *et al.*, 2012).

As estratégias utilizadas para aplicar o conceito de Edifício de Balanço Energético Nulo foram: 1) utilização de sistemas de arrefecimento passivo, 2) sistemas de painéis fotovoltaicos/solar térmico e 3) sistemas de ventilação e iluminação natural.

De seguida apresenta-se uma breve descrição do edifício através do Quadro 2.1 (Aelenei *et al.*, 2010; Gonçalves *et al.*, 2012 e Gonçalves, 2005).

**Quadro 2.1** – Descrição sumária das características do Edifício Solar XXI.

<b>Edifício Solar XXI</b>	
<b>Localização</b>	Lisboa Lat. 38°46'20,27'' Long. 9°10'39,83''
<b>Proprietário</b>	Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)
<b>Coordenador de Projeto</b>	Hélder Gonçalves
<b>Arquitetos</b>	Pedro Cabrita & Isabel Diniz
<b>Custo do Edifício</b>	800€/m <sup>2</sup> (impostos incluídos)
<b>Tipologia</b>	Edifício de serviço, salas e gabinetes de trabalho e laboratórios
<b>Dados Climáticos</b>	Período de aquecimento: 5,3 meses Graus-dias de aquecimento: 1190°C (Tb 20°C)
<b>Contexto Urbano</b>	Urbano
<b>Área Total de Piso</b>	1500 m <sup>2</sup>
<b>Área de Piso Aquecida</b>	1200 m <sup>2</sup>
<b>Área Total de Fachada</b>	1436 m <sup>2</sup>
<b>Nº de pisos</b>	3 (sendo um semi-enterrado)
<b>Distribuição</b>	As salas de ocupação permanente localizam-se na frente orientada a sul (garantindo a insolação direta o que promove ganhos no inverno). As zonas localizadas a norte do edifício são ocupadas por espaços laboratoriais e salas para grupos de trabalho cuja ocupação é de carácter menos permanente. A zona central é o espaço de circulação e distribuição, esta tem uma ampla clarabóia que ilumina zenitalmente os três pisos, permitindo também ventilação através de aberturas nesta.
<b>Soluções Construtivas</b>	<b>Paredes:</b> simples de alvenaria de tijolo de 22 cm de espessura, isoladas pelo exterior com 6 cm de poliestireno expandido, com uma transmissão térmica de 0,45 W/m.°C na zona corrente e 0,55 W/m.°C na zona de pontes térmicas. <b>Cobertura:</b> laje maciça, isolada pelo exterior com 10 cm de isolamento (5 cm de poliestireno expandido + 5 cm de poliestireno extrudido), com uma transmissão térmica de 0,26 W/m.°C. <b>Pavimento:</b> o pavimento em contacto com o solo é igualmente isolado com 10 cm de poliestireno expandido. <b>Vãos envidraçados:</b> constituídos por vidro duplo incolor com uma transmissão térmica de 3,50 W/m.°C, protegidos por estores exteriores de lâminas reguláveis, o que conduz a fatores solares de verão na ordem de $F_s = 0,09$ .
<b>Pressupostos de projeto</b>	<b>Otimização da qualidade da sua envolvente</b> para garantir a diminuição das perdas térmicas no período de inverno. <b>Potenciação dos ganhos solares no edifício</b> através da sua implantação, dimensionamento e orientação das áreas de vãos do edifício.



## 2.3 Conceito de Edifícios de Balanço Energético Nulo

A evolução natural de um edifício de baixo consumo é um edifício de balanço energético nulo (*net Zero-energy Building – nZEB*). De acordo com o Artigo 2º da EPBD (2002) um *nZEB* é definido como “Um edifício com necessidades nulas de energia trata-se de um edifício com um desempenho energético muito elevado, onde as necessidades de energia nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas suas proximidades.” (EPBD, 2002).

Teoricamente um *nZEB* é um edifício com necessidades energéticas muito reduzidas, que, em comparação com os edifícios correntes, obtém-se através de um estudo e proveito dos ganhos energéticos, sendo possível equilibrar as necessidades energéticas remanescentes através do fornecimento de energia de fontes renováveis (Torcellini *et al.*, 2006).

De acordo com Torcellini *et al.* (2006) um *nZEB* pode ser definido de diversas formas, dependendo dos objetivos do projeto. Usualmente os proprietários fixam os seus objetivos nos baixos custos, por outro lado as entidades gestoras interessa-lhes a redução dos valores primários ou finais do consumo energético, enquanto os projetistas limitam os seus objetivos de acordo com a regulamentação e a forma de obtenção da energia a consumir.

Tendo em conta o exposto no parágrafo anterior, Torcellini *et al.* sugeriram as seguintes quatro definições sendo estas, atualmente mais comumente utilizadas para o efeito:

- **Net zero site energy:** aplica-se a um *nZEB* que produz no mínimo energia renovável suficiente para colmatar a consumida localmente durante um ano;
- **Net zero source energy:** aplicável às *nZEB*'s que produzem, pelo menos, tanta energia renovável quanto a consumida num ano, sendo que o valor da energia consumida é contabilizada na fonte. *Source energy* refere-se à energia primária utilizada para gerar e distribuir a energia para o local. Para calcular a energia de um edifício-fonte, importada e exportada, esta deve ser multiplicada pelos respetivos fatores de conversão;
- **Net zero cost energy:** definição aplicada a um *nZEB* em que o custo anual imposto ao utilizador pela importação de energia é rebatido pela exportação da energia produzida;
- **Net zero-energy emissions:** aplica-se a um *nZEB* que produza energia renovável sem emissões, compensando assim o consumo de energia de fontes emissoras.

Note-se que todas as definições são válidas, o que difere entre cada uma são as vantagens e inconvenientes associados à sua utilização. Tal como mostra o Quadro 2.2.

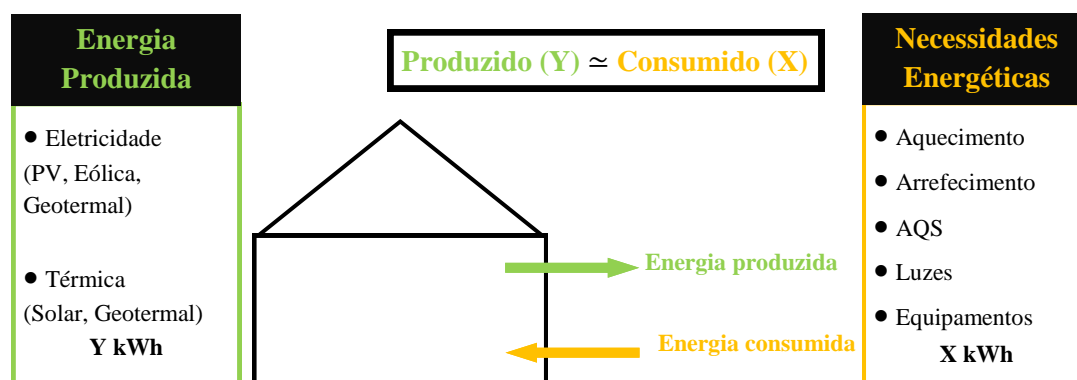
A Agência Internacional de Energia (E.I.A.) por outro lado define os *nZEB*'s como sendo edifícios que ao invés da obtenção de energia através da utilização de combustíveis fósseis, utilizam energia proveniente de energia solar ou outras fontes renováveis (Laustsen, 2008). Segundo Laustsen (2008) os edifícios *nZEB* podem ser classificados de acordo com as seguintes definições:

- **Zero net energy buildings:** edifícios que durante um espaço de tempo, nunca inferior a um ano, são neutros, ou seja, os edifícios fornecem tanta energia à rede de fornecimento como a que retira. Desta forma não existe a necessidade de consumo de qualquer tipo de combustível fóssil para obter energia para aquecimento, arrefecimento, iluminação, equipamentos e para aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS), apesar de poderem utilizar energia da rede fornecedora;
- **Zero stand alone buildings:** edifícios que não requerem ligação à rede de abastecimento ou utilizam-na apenas em caso de falha. Os edifícios autónomos conseguem armazenar energia;

- **Plus energy buildings:** edifícios que produzem mais energia para a rede de abastecimento do que eles próprios consomem;
- **Zero carbon buildings:** edifícios que não usam energia obtida através de recursos que impliquem a emissão de dióxido de carbono. Ao longo do ano, estes edifícios são carbono neutro ou positivo, pois produziram energia livre de CO<sub>2</sub> suficiente para equilibrar o possível consumo de energias não livres de carbono.

**Quadro 2.2** – Vantagens e desvantagens das definições dos *nZEB* por Torcellini *et al.*.

Definição	Vantagem	Desvantagem
<b>Site <i>nZEB</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil implementação,</li> <li>• Verificação através de medições <i>in situ</i>,</li> <li>• <i>nZEB</i> mais conservativo,</li> <li>• O desempenho não é alterado por fatores exteriores,</li> <li>• De fácil compreensão e comunicação,</li> <li>• Energeticamente eficiente a nível do projeto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessita de maior número de módulos fotovoltaicos,</li> <li>• Alguns custos não são tidos em conta,</li> <li>• Alguns tipos de combustíveis não são considerados,</li> <li>• Não contabiliza diferenças não energéticas entre os diferentes tipos de combustíveis.</li> </ul>
<b>Source <i>nZEB</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Têm em conta todos os custos tidos com a energia existente no local,</li> <li>• Alcance de forma fácil o estatuto de <i>nZEB</i>,</li> <li>• Tem maior impacto no sistema de energia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não contabiliza diferenças não energéticas entre os diferentes tipos de combustíveis.</li> <li>• A conversão em energia primária é feita de forma genérica,</li> <li>• Alguns custos não são tidos em conta,</li> <li>• Existe a necessidade de definição do fator de conversão fonte-local, o que necessita de diversos dados.</li> </ul>
<b>Cost <i>nZEB</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De fácil implementação e medição,</li> <li>• O mercado exige resultados equilibrados de acordo com os diferentes combustíveis,</li> <li>• Tem-se um controlo mais eficiente,</li> <li>• É verificado através dos cálculos energéticos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode não se refletir na rede elétrica nacional, pois mais painéis fotovoltaicos podem ser mais importantes na redução dos consumos locais do que na venda de energia à rede,</li> <li>• O seu controlo temporal é difícil, pois trata-se de uma energia instável.</li> <li>• Existe a necessidade de realizar acordos que promovam o equilíbrio entre a energia produzida e a energia consumida e respetivos custos energéticos.</li> </ul>
<b>Emissions <i>nZEB</i></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Em termos de energia verde trata-se da melhor definição,</li> <li>• Contabiliza diferenças não energéticas entre os diferentes tipos de combustíveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe a necessidade de empregar fatores de emissão próprios.</li> </ul>



**Figura 2.8** – Produzido (Y)  $\approx$  Consumido (X). Imagem ilustrativa do conceito *nZEB*

No âmbito desta dissertação de mestrado entende-se que a designação “*nZEB*” seja/é correspondente a um edifício que tenha balanço energético nulo, ou seja, os seus consumos, de valores mínimos, são anulados através da produção de energia, garantindo-se assim um balanço energético anual nulo, desta forma vai-se de encontro ao referido no Artigo 2º da EPBD recast (2010). Na Figura 2.8 pode ver-se uma descrição sumária de um edifício *nZEB*.

## 2.4 Implementação do conceito *nZEB* na Europa

Existem normas voluntárias criadas para auxiliar a implementação do conceito *nZEB*, tais como: a norma *Passivhaus*, o Projeto *Passive-On*, a Diretiva da Performance Energética dos Edifícios ou os Princípios para Edifícios de Balanço Energético Nulo.

### 2.4.1 Norma *Passivhaus*

Na Alemanha, na década de 90, surgem, pelas mãos de Wolfgang Feist e Bo Adamson, os primeiros edifícios de desenho passivo. Após duas experiências comprovou-se que os pressupostos por eles assumidos conduziam a edifícios de baixo consumo energético com um custo razoável para o clima alemão. Com base nos resultados positivos que foram obtidos Wolfgang Feist codificou os pressupostos, tidos no desenho passivo dos edifícios que conceberam, na norma *Passivhaus*, esta fundamentalmente compõe-se de três elementos:

- Um limite energético;
- Um requisito de qualidade;
- Um conjunto definido de sistemas passivos preferidos que possibilitam cumprir o limite energético e atingir o requisito de qualidade e são economicamente viáveis.

Que em termos técnicos significa que o edifício deve responder aos seguintes requisitos:

- O edifício deve ser concebido de forma a que as suas necessidades anuais de aquecimento não excedam os 15 kWh/m<sup>2</sup>;
- O consumo energético total anual em energia primária não deve exceder os 120 kWh/m<sup>2</sup>;
- O edifício deve ser estanque ao ponto de apenas permitir renovações de ar não superiores a 0,6 h<sup>-1</sup> ( $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ ).

Dado que o clima da Europa central é bastante rigoroso na estação de aquecimento, a norma *Passivhaus* assenta sobre esse importante aspeto, o que não ocorre com os países mediterrânicos, estes também necessitam de aquecimento no inverno, mas há que ter em atenção que também tem de se ter em consideração as necessidades de arrefecimento. Desta forma surge o Projeto *Passive-On*.

### 2.4.2 Projecto *Passive-On*

Na arquitetura tradicional do sul europeu nota-se a predominância de soluções construtivas que permitem a diminuição das necessidades de arrefecimento, o que levou a que o desenho passivo atual empregue tais técnicas.

O Projeto *Passive-On* foi financiado pela *Intelligent Energy* no âmbito do programa europeu SAVE e tinha como objetivo primordial a investigação da aplicabilidade do padrão da norma *Passivhaus* em climas temperados, promovendo a divulgação dos seus resultados.

O objetivo foi subdividido em três partes:

- Promover linhas diretrizes de projeto e a utilização de ferramentas de simulação para desenvolver Casas Passivas económica e estruturalmente viáveis;
- Proporcionar um relatório de alcance e estratégia para instituições nacionais e locais tendo em conta as diretrizes da União Europeia;
- Mais genericamente o projeto procura disseminar o conceito de Casa Passiva nos países parceiros do projeto.

O resultado do estudo permitiu a criação de uma proposta de revisão da definição da norma *Passivhaus*, sendo que as principais alterações que procuram tornar a norma relevante nos países mediterrânicos são:

- A introdução explícita de um limite de necessidades de arrefecimento para o verão (15 kWh/m<sup>2</sup>.ano).
- Requisitos mínimos de conforto no verão; as temperaturas interiores de verão não devem exceder as temperaturas do conforto adaptativo como definidas na norma EN 15251. Utilizando o modelo de conforto adaptativo garantem-se temperaturas confortáveis compatíveis com o desenho passivo.
- A atenuação do limite da estanquidade do ar da envolvente do edifício para  $n_{50} \leq 1\text{h}^{-1}$  possibilitando que uma casa passiva possa cumprir a norma *Passivhaus* sem a necessidade de um sistema de ventilação ativo.

### **2.4.3 Diretiva da Performance Energética dos Edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive – EPBD*)**

A diminuição do consumo energético no sector residencial pode ser feita de duas formas: melhorando as condições térmicas do edifício e optando por equipamentos de baixo consumo.

Com este intuito, em 2002, foi criada a Diretiva da Performance Energética dos Edifícios (EPBD, 2002). Esta diretiva europeia veio tornar as exigências regulamentares do conforto térmico mais restritas no que toca à construção e renovação de edifícios, certificação energética, inspeções e campanhas de renovação ou aplicação de sistemas de produção de energia.

Reconhecendo a diversidade na construção devido às diversas culturas e diversos climas existentes por toda a União Europeia, a diretiva não prescreve uma abordagem uniforme para a aplicação do seu objetivo nem uma metodologia de cálculo para atingi-lo. De forma a adicionar flexibilidade, exige que os Estados-Membros elaborem planos nacionais especificamente projetados para aumentar o número de *nZEB*'s, refletindo as condições nacionais, regionais ou locais. Os planos nacionais terão de traduzir o conceito de *nZEB* em medidas práticas e aplicáveis para o país em questão.

Em 2010 foi realizada uma revisão à EPBD (2002), desta forma passou-se a ter a EPBD recast (2010), sendo que uma das novas medidas impostas por este é que até ao ano 2020 todos os novos edifícios sejam caracterizados como edifícios de balanço energético nulo, estando também incluídas as grandes renovações realizadas a um edifício já construído.

#### **A estratégia europeia para diminuição do consumo energético aplicada a Portugal**

A Diretiva Europeia 2002/91/CE foi transposta para o Direito Nacional Português a 4 de Abril de 2006 através de um pacote legislativo composto por três Decretos-lei:

- O Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006) que transpõe parcialmente para a ordem

jurídica a Diretiva nº 2002/97/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

- O Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE, 2006).
- O Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006).

A implementação da EPBD em Portugal passou por três fases:

- 1 de Julho de 2007: aplicação do SCE a edifícios novos com uma área total de mais de 1000 m<sup>2</sup>, registados para construção (quando solicitada a autorização de construção) depois desta data.
- 1 Julho de 2008: aplicação do SCE a novos pequenos edifícios, independentemente da área, sendo registados para construção (quando solicitada a licença de construção) depois desta data.
- 1 Janeiro de 2009: a exigência de uma certificação energética de todos os edifícios entra em vigor. Todos os edifícios, de habitação ou comércio, que sejam vendidos ou arrendados depois de Janeiro de 2009 devem ter um Certificado de Eficiência Energética, que inclua informação sobre o nível de eficiência do edifício (IDEAL – EPBD, 2011).

#### **2.4.4 Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (*Principles for Nearly Zero-Energy Buildings*)**

Existem diversos estudos que visam esta nova forma de encarar as necessidades versus a produção energética. Um dos estudos mais recente é o Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (*Principles for nearly Zero-Energy Buildings*) (Atanasiu, 2011).

De acordo com o estudo a União Europeia tem como objetivo reduzir de forma drástica as emissões de gases de efeito de estufa provenientes do sector residencial. A União Europeia pretende reduzir no mínimo 80% das emissões, em relação aos valores de 1990, até ao ano de 2050 (Atanasiu, 2011). De momento encaram-se três métodos de atingir o objetivo em questão:

- Reduzir substancialmente o consumo energético dos edifícios existentes;
- Reduzir substancialmente o consumo energético dos edifícios novos;
- Produzir energia através de fontes renováveis suficiente para colmatar as necessidades dos edifícios novos e existentes.

Atingir o objetivo anterior através da redução do consumo energético por parte do parque edificado existente tem sido uma tarefa complexa, pois não se consegue garantir que até 2050 todos os edifícios sejam renovados, sem contar com o facto de muitos dos edifícios serem históricos, o que acarreta muitas limitações.

Ainda faltando construir mais de um quarto do parque edificado previsto para o ano de 2050 estima-se que, para se atingir as percentagens de redução exigidas pela União Europeia, os edifícios construídos a partir deste ano teriam de ter reduções entre os 88% e 91%, garantindo assim, através do valor médio, obter a redução de 80%. Assim sendo, o consumo energético e as emissões de gases de efeito de estufa dos edifícios novos terão de ser nulos, a fim de atingir os objetivos da União Europeia.

Em toda a Europa existe uma grande variedade de conceitos e exemplos para edifícios energeticamente eficientes (passive house, zero-energy, 3-litre, plus energy, Minergie, Effnergie, etc).

Esta variedade deve-se às diferenças climáticas e culturais existentes, podendo assim existir mais definições e requisitos, dependendo do facto de se tratar de edifícios novos ou existentes, residenciais ou não residenciais. Os pontos de vista sobre como devem ser definidas as *nZEB*'s, o que significam e que técnicas são adequadas, diferem muito de região para região.

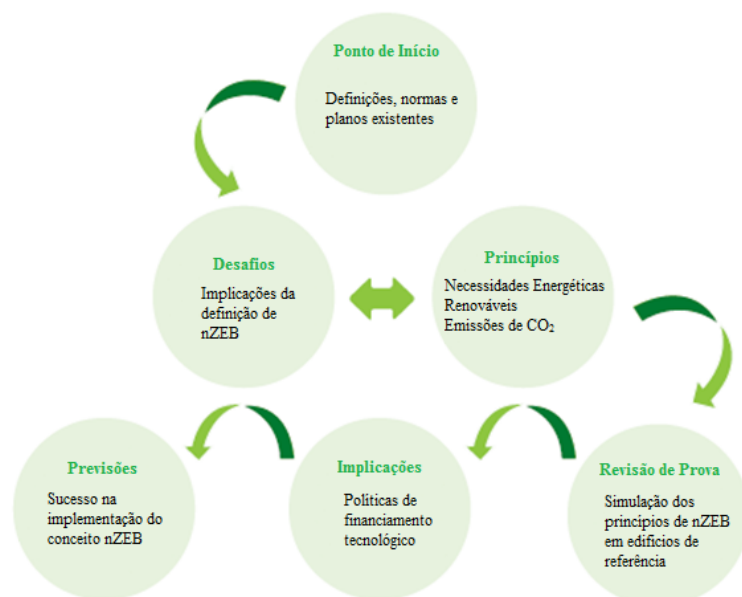
Além da flexibilidade da definição geral da EPBD para *nZEB*, várias questões surgem quanto aos aspetos práticos da uma definição *nZEB*:

- Como manter a definição *nZEB* suficientemente flexível de forma a abranger os conceitos existentes?
- Qual a maneira correta de definir e estabelecer a quota das energias renováveis?
- Como determinar o melhor equilíbrio entre a eficiência energética e energias renováveis?
- Como estabelecer a definição *nZEB* por forma a garantir que se consiga atingir os mesmos níveis de energia e redução de gases de efeito de estufa?
- Como ligar a definição *nZEB* ao custo de otimalidade-princípios, a fim de ter convergência e continuidade?

No presente momento, a Comissão Europeia, os Estados-Membros, as partes interessadas e os especialistas estão a discutir os diferentes aspetos das *nZEB*'s. Em geral, há uma necessidade urgente de estabelecer os princípios e os métodos comuns a serem tomados pelos Estados-Membros para a elaboração eficaz, prática e bem pensada das definições *nZEB* e para impulsionar o mercado para as *nZEB*'s.

Assim, o objetivo do estudo Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo é contribuir para um entendimento comum e transnacional para:

- Uma definição clara do termo *nZEB* para todos os estados membros;
- Desenvolver princípios sustentáveis na implementação das medidas que possam tornar um edifício em *nZEB*;
- Desenvolver soluções técnicas e estudar as suas implicações na construção e respetivo mercado.



**Figura 2.9** – Diagrama dos Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (Atanasiu, 2011).

O estudo baseia-se em conceitos e normas existentes no sector da construção, analisa os principais desafios metodológicos e suas implicações na definição do conceito *nZEB*, compila um conjunto possível de princípios e avalia o seu impacto através do estudo da sua aplicação em edifícios de referência. Posteriormente irá analisar as simplificações tecnológicas, financeiras e políticas dos resultados obtidos. O estudo termina fornecendo um panorama sobre novos passos necessários para uma implementação bem sucedida do conceito *nZEB*. Na Figura 2.9 pode ver-se a estrutura do estudo (Atanasiu, 2011).

O estudo pretende também apoiar os agentes na Comissão Europeia e dos Estados-Membros no desenvolvimento de uma opinião bem fundamentada sobre os princípios do conceito de *nZEB*, promovendo a compreensão da situação atual e os conceitos existentes para edifícios de baixo consumo energético.

## **2.5 Concretização de um Edifício de Balanço Energético Nulo**

As necessidades energéticas podem ser diminuídas recorrendo às seguintes soluções passivas:

- Estudo das soluções construtivas que melhor se adaptam ao clima em questão;
- Otimização das espessuras de isolamento;
- Obtenção da orientação ótima dos edifícios em relação à radiação solar;
- Otimização das áreas de envidraçados, uma grande área de envidraçado a sul e uma pequena área na fachada norte, tratando-se do hemisfério norte;
- Introdução de palas de sombreamento sobre as janelas com um funcionamento estudado ao pormenor por forma a garantir uma utilização ótima da radiação solar;
- Estudo do processo de renovação de ar por ventilação natural.

Já o fornecimento energético pode ser aumentado:

- Recorrendo-se ao uso de equipamentos com elevada eficiência energética;
- Executando-se bons estudos dos sistemas de climatização e fazendo uma correta implementação destes;
- Optar-se por sistemas híbridos de fotovoltaico e solar térmico.

É importante referir que um edifício *nZEB* não tem de ter, na prática, um baixo consumo, desde que o seu consumo seja equilibrado pela produção de energia, mas desta forma não se está a ter em conta a relação otimalidade/custo, outra nota importante é que um *nZEB* não tem de ser autónomo, ou seja, não necessita de depender apenas da sua produção elétrica, este pode receber energia da rede elétrica desde que posteriormente introduza nela igual valor garantindo assim um balanço anual nulo.

Na Figura 2.2 mostra-se o gráfico do balanço energético nulo obtido aquando da boa aplicação dos pontos anteriormente referidos. Como se pode ver por este o primeiro passo é otimizar, através de soluções passivas o edifício corrente, passando a ter-se um edifício de baixo consumo, o segundo passo é aplicar sistemas de produção de energia limpa que permitam equilibrar o consumo remanescente, garantindo assim a obtenção da categoria *nZEB*.





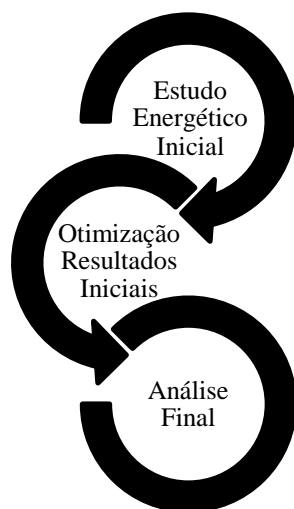
# CAPÍTULO 3 - Metodologia de Estudo

## 3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de estudo. O capítulo é estruturado em três partes: a primeira apresenta a metodologia do estudo, a segunda introduz os programas utilizados e a terceira e última expõe o caso de estudo, apresenta a moradia de referência e indica os pressupostos tidos em conta na abordagem ao estudo das necessidades energéticas.

## 3.2 Metodologia

De uma forma concisa a Figura 3.1 indica a metodologia realizada neste estudo. Como se pode ver por esta a metodologia está dividida em três fases.



**Figura 3.1** – Diagrama da metodologia do estudo realizado.

O primeiro passo no estudo de comportamento térmico consistiu na análise das necessidades energéticas da moradia de referência através do *EnergyPlus* (2010), tendo sido garantida a sua conformidade regulamentar.

O segundo passo, o estudo de otimização, está estruturado em três fases. A primeira fase incidiu no estudo das soluções ótimas em termos das soluções construtivas analisadas. A segunda fase da otimização consistiu no estudo, com recurso a algoritmos de otimização multi-dimensional (GenOpt, 2011), de variáveis passíveis de otimização por forma a diminuir as necessidades energéticas. A terceira e última fase da otimização consistiu na conjugação dos resultados obtidos nas duas fases anteriores com o objetivo de obter um panorama completo dos estudos das soluções de otimização encontradas.

O estudo termina com uma análise dos resultados obtidos tendo em conta as zonas climáticas representativas de Portugal Continental.

### 3.3 Ferramentas de simulação utilizadas

No presente estudo foram utilizadas três ferramentas distintas. Para a realização da geometria utilizou-se a ferramenta *Google SketchUp* versão 8 (2011), que através do plug-in *OpenStudio* permite fazer a ligação da geometria do edifício à ferramenta de simulação, o *EnergyPlus* versão 6 (2010) , esta segunda sendo utilizada para a realização das simulações dinâmicas. Já em relação à ferramenta *GenOpt* versão 3.1 (2011) esta foi necessária para a realização da optimização dos parâmetros a estudar.

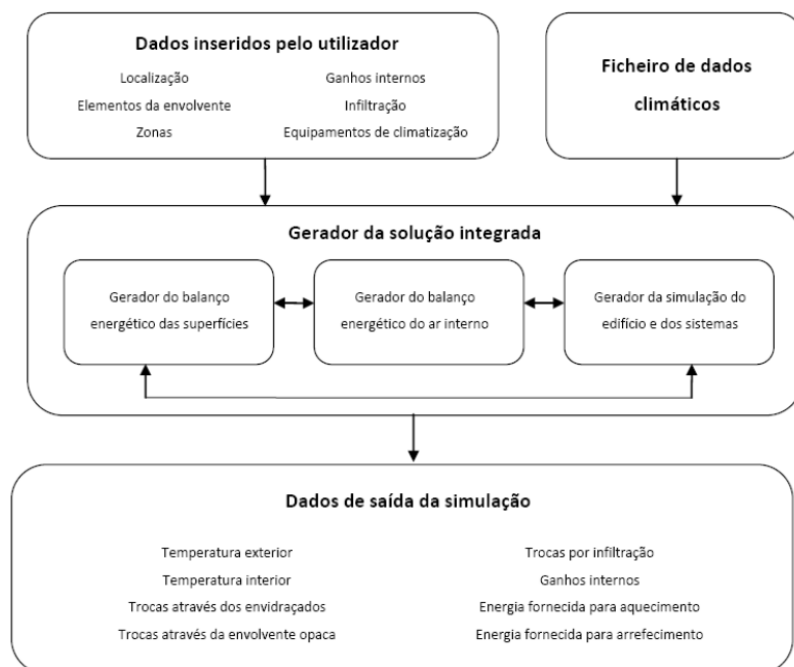
Os pontos que se seguem introduzirão as ferramentas de simulação e otimização utilizadas no decorrer do caso de estudo. Pretende-se assim explicar de forma sucinta os princípios de utilização das ferramentas *EnergyPlus* (2010) e *GenOpt* (2011).

#### 3.3.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa informático complexo utilizado na simulação do comportamento térmico de edifícios e foi desenvolvido com o intuito de facilitar o cálculo térmico e torná-lo mais fiável. Ao contrário do RCCTE, o *EnergyPlus* baseia-se numa metodologia de cálculo dinâmico e por esta razão permite uma avaliação do comportamento térmico bastante mais rigorosa, pois podem ser empregues mais parâmetros, que são mais realistas do que os considerados no RCCTE.

O cálculo das necessidades energéticas é realizado a partir dos dados inseridos pelo utilizador (*inputs*) – relativos à geometria, materiais da envolvente, sistemas e regimes de climatização, ficheiro de dados climáticos do local de implantação – gerando o balanço energético com recurso aos diferentes módulos que compõem o programa.

Resumidamente, a estrutura de funcionamento do *EnergyPlus* pode ser ilustrada pela Figura 3.2.



**Figura 3.2** – Diagrama do funcionamento do programa *EnergyPlus*.

A equação utilizada pelo programa para o cálculo do balanço energético é:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad [1]$$

Em que:

- $C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a energia armazenada no ar da zona z;
- $\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i$  é a soma das trocas por convecção devido a fontes internas;
- $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é a soma das trocas de calor por convecção com cada uma das superfícies que delimita a zona;
- $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  é a soma das trocas de calor devido à mistura de ar da zona em causa e a zona i;
- $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  é a transferência de calor devido à renovação de ar;
- $\dot{Q}_{sys}$  é a energia auxiliar a fornecer pelo sistema de climatização.

### 3.3.2 GenOpt

O *GenOpt*, também denominado por *Generic Optimization Program*, é um programa de otimização genérica para minimização multidimensional de uma “função de custo” que é calculada por um programa externo (Wetter, 2011).

A ferramenta de otimização *GenOpt* permite encontrar os valores ótimos dos parâmetros em estudo tratados como variáveis independentes pelo programa em função da minimização de uma “função de custo”. O *GenOpt* apresenta a vantagem de poder ser acoplado a qualquer programa de simulação que leia os ficheiros de *input* através de um ou mais arquivos de texto e que produza ao mesmo tempo ficheiros de *output* também num arquivo de texto.

A utilização desta ferramenta é justificada pelas suas potencialidades, usualmente os projetistas conjecturam valores a colocar nos parâmetros do sistema e refazem a simulação, o que torna o processo ineficiente e trabalhoso, quando o sistema tem um número elevado de parâmetros torna-se quase impossível ao projetista conseguir compreender todas as ramificações das suas escolhas (Holst, 2003), a utilização da ferramenta *GenOpt* permite que o processo de otimização seja mais elaborado e eficiente.

De uma forma geral os problemas de otimização que o *GenOpt* resolve podem ser definidos da seguinte forma:

- $X$  é um conjunto de imposições colocadas pelo utilizador
- $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  é a “função de custo” a otimizar.

O *GenOpt* irá encontrar o mínimo da “função de custo”,  $f(\cdot)$ , testando todas as combinações possíveis dentro do conjunto de imposições,  $X$ , tendo-se assim:

$$\min_{x \in X} f(x) \quad [2]$$

Este problema geralmente é resolvido por métodos iterativos, que constroem sequências infinitas, de aproximações cada vez melhores para uma solução, ou seja, um ponto que satisfaz uma condição de otimalidade. Se  $X \subset \mathbb{R}^n$ , com  $n \in \mathbb{N}$ , e  $X$  ou  $f(\cdot)$  não forem convexos, não se tem um teste para otimalidade global, no máximo o que se pode obter é um ponto que satisfaça uma condição de otimalidade local. Além disso, para  $X \subset \mathbb{R}^n$ , os testes para otimização são baseados em suposições de diferenciabilidade da “função de custo”. Por conseguinte, os algoritmos de otimização podem falhar, possivelmente longe de uma solução, se  $f(\cdot)$  não for diferenciável nas variáveis contínuas independentes (Wetter, 2003).

Alguns algoritmos de otimização são mais propensos a falhar em descontinuidades do que outros. O *GenOpt* tem algoritmos que são pouco sensíveis a pequenas descontinuidades da “função de custo”, tais como os *Generalized Pattern Search algorithms*, que também podem ser utilizados em conjunto com a heurística de algoritmos de otimização global.

Os problemas de otimização que o programa *GenOpt* pode resolver estão englobados nos pontos que se seguem:

- Problemas com variáveis contínuas;
- Problemas com variáveis discretas;
- Problemas com variáveis contínuas e discretas;
- Problemas em que a “função de custo” é avaliada por uma ferramenta de simulação do comportamento térmico de edifícios.

A diferenciação entre cada tipo de problema a resolver permite a análise dos algoritmos existentes no *GenOpt* de forma a poder fazer-se uma escolha acertada do que melhor se adequa à sua resolução.

É desta forma que o *GenOpt* participa neste trabalho, pois o estudo realizado visa obter a minimização de uma “função de custo” de acordo com os dados obtidos através do programa de simulação, assim este pode ser enquadrado num dos problemas anteriormente assinalados permitindo a sua fácil resolução.

### **Princípios de Funcionamento do GenOpt**

Para realizar a otimização, o *GenOpt* grava automaticamente os arquivos de entrada (*Inputs*) para o programa de simulação (Figura 3.4). Estes são baseados em arquivos do modelo de simulação, que são escritos para o programa de simulação em uso.

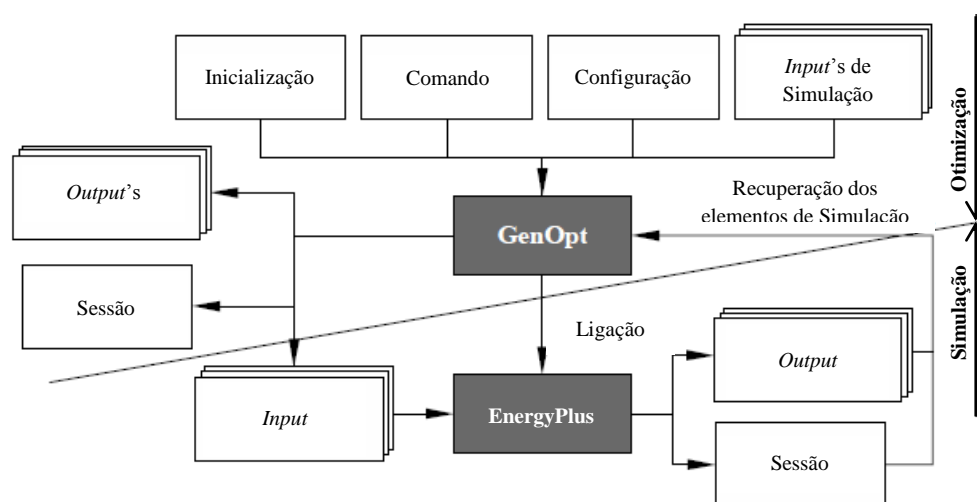
De seguida, o *GenOpt* inicia o programa de simulação verificando possíveis erros decorridos, lê o valor da função a ser minimizada a partir do arquivo resultante, e de seguida, determina o novo conjunto de parâmetros de entrada para a próxima simulação.

O processo descrito anteriormente é repetido até que iterativamente se obtenha um mínimo da “função de custo”. Durante a otimização, a interface gráfica do *GenOpt* apresenta os resultados intermédios, permitindo ao mesmo tempo o acompanhamento do processo de convergência.

Se o problema de simulação tiver algumas limitações subjacentes, estas podem ser tomadas em linha de conta, quer por uma implementação padrão ou através da modificação da “função de custo”. O programa oferece um esquema padrão para restrições simples sobre as variáveis independentes (*box-constraints*), bem como um formalismo que permite a adição de restrições sobre as variáveis dependentes por utilização de funções de “penalidade” ou “barreira”.

De uma forma resumida e prática pode afirmar-se que a utilização do *GenOpt* é relativamente simples. Este liga ao programa de simulação em uso, que neste caso é o *EnergyPlus*, e iterativamente irá variar os valores dos parâmetros de acordo com a função imposta pelo usuário, recorrendo aos pressupostos impostos por um dos algoritmos existentes na memória do programa, que também é escolhido pelo usuário. No caso do presente estudo recorreu-se ao algoritmo de otimização Hooke-Jeeves melhorado (Hooke, R.; Jeeves, A., 1961).

A Figura 3.3 apresenta de forma simplificada o processo realizado pelo *GenOpt* em ligação com o programa de simulação.



**Figura 3.3** – Diagrama do funcionamento do programa *GenOpt*, retirado do seu manual de utilização (Wetter, 2011).

É de referir que o *GenOpt* tem uma interface aberta, tanto pelo lado do programa de simulação como pelo lado do algoritmo de otimização, permitindo o acoplamento de qualquer programa de simulação, como *EnergyPlus*, *TRNSYS*, *SPARK*, *IDA-ICE*, *DOE-2*, ou qualquer programa escrito pelo usuário, através da modificação do arquivo de configuração.

A troca de dados entre o *GenOpt* e o programa externo é feita apenas com os arquivos de texto. Para realizar a otimização, o *GenOpt*, com base em um ou mais ficheiros de entrada, gera automaticamente os novos ficheiros de entrada para o programa de simulação. Para gerar esses ficheiros, o usuário copia os já definidos e substitui os valores numéricos das variáveis independentes a serem modificados por palavras-chave.

O *GenOpt* em seguida substitui as palavras-chave com os valores numéricos correspondentes e grava os novos ficheiros de entrada. Essa abordagem permite ao *GenOpt* escrever a entrada de texto para qualquer programa de simulação.

Num arquivo de configuração, o usuário pode especificar qual o programa de simulação a utilizar e onde o *GenOpt* pode encontrar o valor atual da “função de custo”. Isto torna possível acoplar qualquer programa externo ao *GenOpt* sem modificar ou recompilar qualquer programa. A única exigência feita ao programa externo é que este deve ler a entrada de ficheiros de texto e escrever o valor da “função de custo” acrescido de quaisquer possíveis mensagens de erro para um ficheiro de texto (Wetter, 2011).

## Algoritmos de otimização

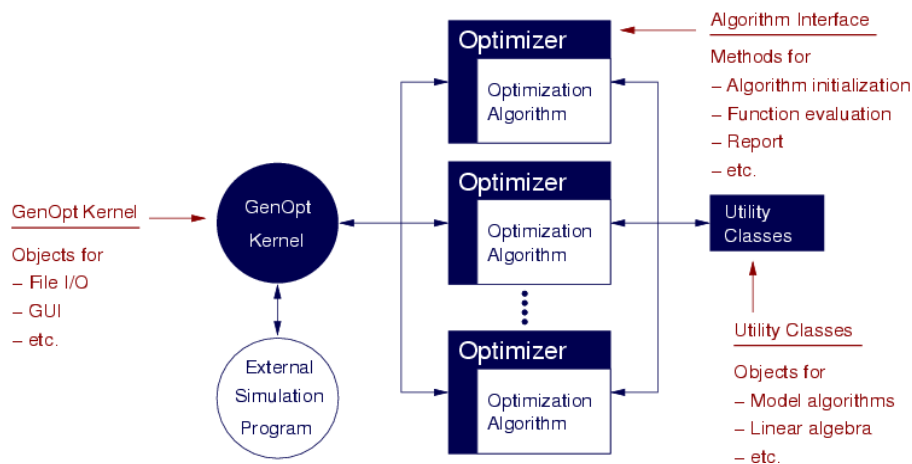
Na sua base de dados o programa *GenOpt* possui os seguintes algoritmos de otimização (Wetter, 2011):

- Algoritmos do grupo *Generalized Search Pattern* (o Hooke-Jeeves e o *Coordinate Search algorithm*), que podem ser executados usando vários pontos de partida;
- Algoritmos do grupo *Particle Swarm Optimization* (para o estudo de variáveis contínuas e/ou discretas independentes), com a modificação que permite contrair as variáveis contínuas independentes para uma malha, por forma a reduzir o tempo de computação;
- Algoritmo híbrido que permite a otimização local baseado no algoritmo de Hooke-Jeeves ou a otimização global através do algoritmo *Particle Swarm Optimization*;
- Algoritmo *Discrete Armijo Gradient*;
- Algoritmo *Elder and Mead's Simplex*;
- Algoritmos da Secção de Ouro e de Fibonacci para minimizações do tipo unidimensional.

Existem também algoritmos que permitem o estudo paramétrico, nomeadamente:

- Gerador de malha, para avaliar uma função em todos os pontos que pertencem à malha, com um espaçamento equidistante ou logarítmico entre os seus vários pontos;
- Pesquisa paramétrica onde apenas uma variável independente é alterada de cada vez.

A ligação do *GenOpt* ao algoritmo escolhido pelo utilizador é realizada de uma forma simples, tal como o diagrama da Figura 3.4 demonstra.



**Figura 3.4** – Diagrama que demonstra o funcionamento da ligação entre o *GenOpt* e a sua base de dados de algoritmos (Wetter, 2011).

Os usuários podem facilmente implementar os seus próprios algoritmos de otimização através do alargamento do *Optimizer*, que oferece acesso ao *Kernel* do *GenOpt*. O *Optimizer* é a interface entre o *Kernel GenOpt* e o algoritmo de otimização. Este oferece artifícios que permitem a recuperação das definições necessárias ao algoritmo específico, dos valores iniciais das variáveis independentes, dos limites possíveis das variáveis independentes e como avaliar uma simulação com o atual conjunto de variáveis independentes ou relatar os resultados da execução de otimização. Assim, o usuário só tem que lidar com o algoritmo de otimização em si e não com a manipulação de dados, redação de saída, verificação de sintaxe e outros trabalhos de programação (Wetter, 2011).

### **Algoritmo de Hooke-Jeeves**

Tal como referido anteriormente, o algoritmo empregue neste estudo foi o Hooke-Jeeves melhorado, algoritmo que pertence ao conjunto dos algoritmos de otimização multi-dimensional mais propriamente aos algoritmos de Generalized Pattern Search (GPS) (Wetter, 2011).

Os algoritmos do tipo GPS são utilizados para obter minimizações de problemas com variáveis contínuas independentes que tem a seguinte forma:

$$P_c \quad \min_{x \in X} f(x), \quad [3]$$

Em que  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é uma “função de custo” contínua e diferenciável, e os constrangimentos das suas variáveis será denotado da seguinte forma:

$$X \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n | l^i \leq x^i \leq u^i, i \in \{1, \dots, n\}\} \quad [4]$$

Em que  $-\infty \leq l^i < x^i \leq \infty$  para  $i \in \{1, \dots, n\}$ .

Ao juntar o problema anteriormente descrito aos constrangimentos de diferentes tipos obter-se-á:

$$P_{cg} \quad \min_{x \in X} f(x) \quad [5]$$

$$g(x) \leq 0 \quad [6]$$

Em que  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  é um constrangimento diferenciável contínuo da função, com  $x \in \mathbb{N}$ . Assume-se que existirá um  $x^* \in X$  que satisfaz  $g(x^*) < 0$ .

A implementação do algoritmo de Hooke-Jeeves é feita tendo em conta as avaliações de precisão de adaptação da função e usando o modelo do algoritmo GPS. Segue-se a explicação da implementação deste.

#### **a) Parâmetros do algoritmo:**

A matriz de procura de direção é definida da seguinte forma:

$$D \triangleq [+s^1 e_1, -s^1 e_1, \dots, +s^n e_n, -s^n e_n] \quad [7]$$

Em que  $s^i \in \mathbb{R}, i \in \{1, \dots, n\}$  é um escalar para cada parâmetro, especificado através do campo *Step* do *GenOpt*.

O parâmetro  $r \in \mathbb{N}, r > 1$  é utilizado para calcular o parâmetro  $\Delta_k$  do tamanho da malha, este é definido pelo parâmetro *MeshSizeDivider*. O valor inicial do expoente do tamanho da malha,  $s_0 \in \mathbb{N}$ , é definido pelo parâmetro *InitialMeshSizeExponent* e o incremento do expoente do tamanho da malha,  $t_k$ , é, para a iteração que não reduz a função, definido pelo parâmetro *MeshSizeExponentIncrement*.

#### **b) Mapa dos movimentos exploratórios**

De forma a tornar mais prático e sucinto o esclarecimento sobre a implementação do algoritmo explica-se separadamente o mapa dos movimentos exploratórios, do mapa de procura global.

**Mapa**  $E_k: \mathbb{R}^n \times \mathbb{Q}_+ \times \mathbb{R}_+^q \rightarrow 2^{M_k}$  (para ‘Procura de Coordenadas’)

**Parâmetro:** Matriz de procura de direção  $D = [+s^1 e_1, -s^1 e_1, \dots, +s^n e_n, -s^n e_n]$

Vector  $\mu \in \mathbb{N}$ .

**Input:** Número da iteração  $k \in \mathbb{N}$ .

Ponto base  $x \in \mathbb{R}^n$ .

Divisor de malha  $\Delta_k \in \mathbb{Q}_+$ .

**Output:** Conjunto de pontos experimentais  $T$

**Passo 0:** Inicializar  $T = \emptyset$ .

Se  $k = 0$ , inicializar,  $\mu^i = 0$  for all  $i \in \{1, \dots, n\}$ .

**Passo 1:** Para  $i = 1, \dots, n$

Definir  $\tilde{x} = x + \Delta_k D_{e_{2i-1+\mu^1}}$  e  $T \leftarrow T \cup \{\tilde{x}\}$ .

Se  $f(\tilde{x}) < f(x)$

Definir  $x = \tilde{x}$ .

Ou

Se  $\mu^i = 0$ , definir  $\mu^i = 1$ , ou configurar  $\mu^i = 0$ .

Definir  $\tilde{x} = x + \Delta_k D_{e_{2i-1+\mu^i}}$  e  $T \leftarrow T \cup \{\tilde{x}\}$ .

Se  $f(\tilde{x}) < f(x)$

Definir  $x = \tilde{x}$ .

Ou

Se  $\mu^i = 0$ , definir  $\mu^i = 1$ , ou configurar  $\mu^i = 0$ .

Fim.

Fim.

Fim.

**Passo 2:** Retoma  $T$ .

Com  $E_k(x, \Delta_k, \epsilon) = T$  para todo o  $k \in \mathbb{N}$ .

### c) Mapa de procura global

O conjunto global de pesquisa mapa  $y_k(\cdot, \cdot, \cdot)$  é definido da forma que se segue. Porque  $y_0(\cdot, \cdot, \cdot)$  depende de  $x_{-1}$ , precisa introduzir-se  $x_{-1}$ , que se define como  $x_{-1} \triangleq x_0$ .

**Mapa**  $y_k: X_k \times \Delta_k \times \mathbb{R}_+^q \rightarrow 2^{M_k}$  (para Procura Global)

**Mapa:** Mapa dos movimentos exploratórios  $E_k: \mathbb{R}^n \times \mathbb{Q}_+ \times \mathbb{R}_+^q \rightarrow 2^{M_k}$

**Input:** Iteração anterior e atual,  $x_{k-1} \in \mathbb{R}^n$  e  $x_k \in \mathbb{R}^n$ .

Divisor de malha  $\Delta_k \in \mathbb{Q}_+$ .

Precisão de resolução  $\epsilon \in \mathbb{R}_+^q$ .

**Output:** Define pesquisa global  $\mathcal{G}_k$ .

**Passo 1:** Definir  $x = x_k + (x_k - x_{k-1})$ .

**Passo 2:** Calcular  $\mathcal{G}_k = E_k(x, \Delta_k, \epsilon)$ .



**Passo 3:** Se  $\left(\min_{x \in \mathcal{G}_k} f(x)\right) > f(x_k)$   
Definir  $\mathcal{G}_k \leftarrow \mathcal{G}_k \cup E_k(x, \Delta_k, \epsilon)$ .  
Fim.

**Passo 4:** Retomar  $\mathcal{G}_k$ .

Com  $y_k(x_k, \Delta_k, \epsilon) = \mathcal{G}_k$ .

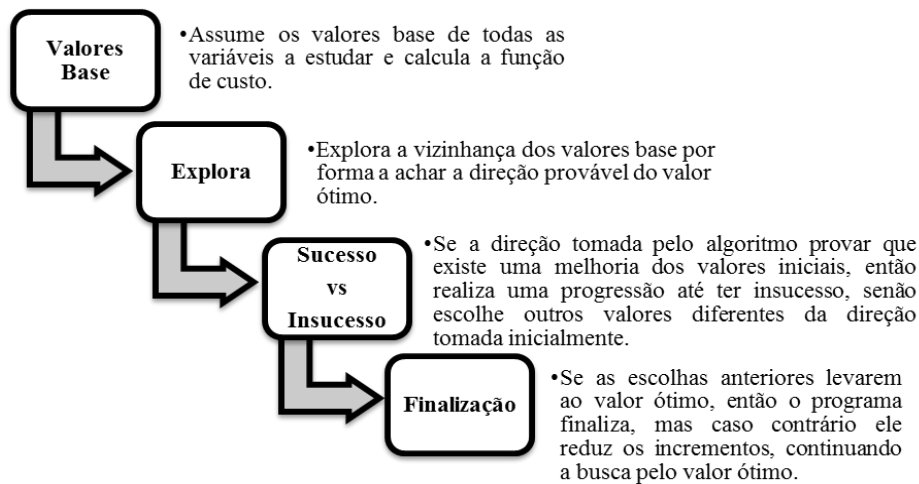
#### d) Mapa de procura local de direção

Se o mapa de procura global, tal como definido anteriormente, falhar na minimização da “função de custo”, então este terá construído um conjunto de  $\mathcal{G}_k$  que contém o conjunto  $\{x_k + \Delta_k D_{e_i} | i = 1, \dots, 2n\}$ . Tal ocorre porque na avaliação de  $E_k(x_k, \Delta_k, \epsilon)$ , no mapa dos movimentos exploratórios todos os “Se  $f(\tilde{x}) < f(x)$ ” surgiram como falsos, e, portanto, construiu-se  $\{x_k + \Delta_k D_{e_i} | i = 1, \dots, 2n\} = E_k(x_k, \Delta_k, \epsilon)$ .

Uma vez que as colunas de D estenderam para  $\mathbb{R}^n$  positivamente, a pesquisa sobre o conjunto  $\{x_k + \Delta_k D_{e_i} | i = 1, \dots, 2n\}$  é uma pesquisa local. Assim, o conjunto construído  $\mathcal{L}_k \triangleq \{x_k + \Delta_k D_{e_i} | i = 1, \dots, 2n\} \subset \mathcal{G}_k$  é um conjunto de pesquisa local.

Consequentemente,  $f(\cdot)$  já foi avaliada em todos os pontos de  $\mathcal{L}_k$ , durante a construção de  $\mathcal{G}_k$  e, portanto, não é necessário avaliar novamente  $f(\cdot)$  numa busca local.

De uma forma rápida e sucinta a Figura 3.5 demonstra como funciona a implementação do algoritmo de Hooke-Jeeves através do *GenOpt*.



**Figura 3.5** – Diagrama do funcionamento do algoritmo de Hooke-Jeeves.

### 3.4 Caso de Estudo

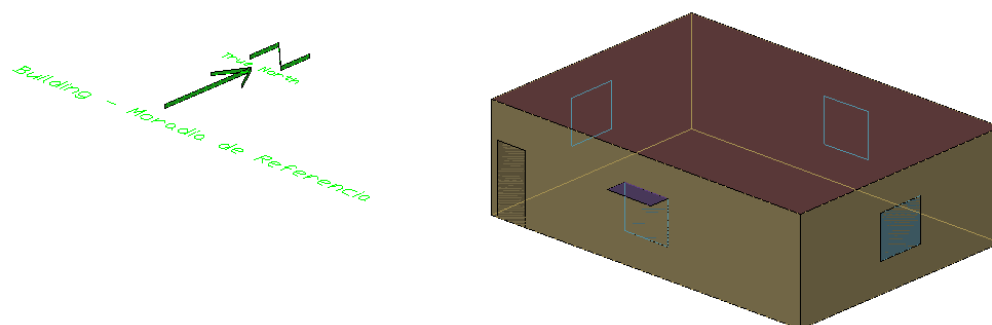
Apresenta-se nesta secção o edifício que serviu de base ao presente estudo. Trata-se de uma habitação unifamiliar (moradia) cuja geometria é:

- Planta: 10m x 7m<sup>1</sup>

<sup>1</sup> As medidas em planta e do alçado foram fornecidas pelos orientadores, de acordo com a ideia de criar uma moradia de referência unifamiliar para uma família de quatro pessoas (dois adultos e duas crianças).

- Cota: 3m
- Janelas: 1,40m x 1,25m<sup>2</sup>
- Pala: 0,60m de comprimento (janela sul)
- Área útil de pavimento:  $A_p = 70\text{m}^2$ .

Na Figura 3.6 pode ver-se um desenho tridimensional do edifício em questão.



**Figura 3.6** – Desenho 3D da moradia de referência.

O estudo pretende conhecer o comportamento térmico de todas as zonas climáticas do país, como tal escolheu-se cinco cidades que no seu todo englobam as seis zonas climáticas de Portugal. Assim os ficheiros climáticos (*weather files*) utilizados foram:

- Bragança
- Évora
- Faro
- Lisboa
- Porto

O Quadro 3.1 Indica para cada cidade os dados climáticos de referência para cada uma delas de acordo com o Anexo III, Quadro III.1 do RCCTE.

**Quadro 3.1** – Dados climáticos por cidade.

Localização	Zona Climática de Inverno	Número de Graus-Dias (GD-°C.dias)	Duração da Estação de Aquecimento (meses)	Zona Climática de Verão	Temperatura Externa de Projeto (°C)	Amplitude Térmica (°C)
Bragança	I3	2850	8	V2	33	15
Évora	I1	1390	5,7	V3	35	17
Faro	I1	1060	6,7	V2	32	12
Lisboa	I1	1190	5,3	V2	32	11
Porto	I2	1610	6,7	V1	30	9

Assumiu-se que a moradia de referência se encontra numa área de campo, ou seja, para motivos de simulação não tem qualquer tipo de obstáculos à sua volta. O seu azimuth é de 0°. A sua exposição solar e ao vento é considerada elevada, devido à falta de obstáculos, referindo-se ainda que não se teve em consideração a altitude do terreno onde está inserido.

<sup>2</sup> Por forma a respeitar o Regulamento Geral das Edificações Urbanas (1951), que afirma que “a área de janelas deve ser 10% da área a iluminar”, deverá ter quatro janelas de 1,75m<sup>2</sup>.

Trata-se de um edifício térreo que servirá de habitação a uma família de quatro pessoas. Para este trabalho não existiu a necessidade de o discretizar, mas assumiu-se que a sua inércia térmica é do tipo forte.

### 3.4.1 Soluções construtivas adotadas

Para o estudo das necessidades iniciais da moradia de referência, as disposições construtivas escolhidas inicialmente são as que se encontram no Quadro 3.2. Estas basearam-se no que é usual ser realizado na construção nacional.

Refere-se que os vãos envidraçados têm caixilharia de alumínio, sendo um caixilho sem quadrícula, com proteção interior clara, do tipo cortina muito transparente na situação de inverno e proteção exterior clara do tipo persiana de réguas plásticas na situação de verão.

**Quadro 3.2** – Soluções construtivas adotadas e respectivos valores de U.

<b>Solução Construtiva</b>	<b>Descrição</b>	<b>U (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>
<b>Paredes exteriores</b>	Reboco tradicional com 1,5 cm Tijolo furado de 11 cm Caixa de ar com 3 cm Isolamento térmico do tipo XPS com 4 cm ou 3 cm Tijolo furado de 11 cm Estuque tradicional com 1,5 cm	0,50/0,58
<b>Paredes interiores</b>	Estuque tradicional com 1,5 cm Tijolo furado de 11 cm Estuque tradicional com 1,5 cm	1,96
<b>Cobertura</b>	Camada de regularização com 5 cm Isolamento térmico do tipo lã de rocha com 8 cm ou 6 cm <sup>3</sup> Camada de forma com 10 cm Laje de betão com 15 cm Estuque tradicional com 1,5 cm	0,42/0,53
<b>Pavimento</b>	Camada de forma com 10 cm Laje de betão com 25 cm <sup>4</sup> Camada de regularização com 10 cm Ladrilho cerâmico, 1 cm	1,60
<b>Envidraçados</b>	Vidro puro incolor com 3 mm Espaço de ar com 13 mm Vidro puro incolor com 3 mm	2,72

<sup>3</sup> Tal como o isolamento colocado nas paredes exteriores, o isolamento da cobertura sofrerá variações dependendo da zona climática, assim, no caso de Bragança e Porto a espessura do isolamento é de 8cm e as restantes cidades tem 6cm de isolamento térmico.

<sup>4</sup> Tal como é usual na construção nacional, optou-se por não se colocar isolamento térmico na laje de pavimento, o que não impede que futuros estudos tenham essa opção em consideração.

### 3.4.2 Aplicação do RCCTE

O objetivo deste ponto é indicar e explicar quais os pressupostos tidos em conta aquando da verificação dos requisitos impostos pelo RCCTE, por forma a garantir um edifício regulamentar segundo a legislação nacional.

#### Perdas térmicas

Para esta habitação apenas se consideraram as perdas através da envolvente, neste caso as paredes exteriores, envidraçados e cobertura. As perdas através das pontes térmicas não foram tidas em conta, pois tornariam o estudo demasiado complexo visto o facto das ferramentas de simulação não estarem preparadas para o efeito. Apesar da influência das pontes térmicas poder ser tida em conta na fase de simulação, considerou-se que a desvalorização da influência das pontes térmicas não seria crítica para o estudo. Contudo, este aspecto poderá ser objeto de estudos futuros.

Os coeficientes de transmissão térmica,  $U^5$ , foram obtidos, para as soluções construtivas seleccionadas para este edifício, por forma a respeitar os requisitos mínimos de qualidade térmica para a envolvente dos edifícios exigidos no anexo IX do RCCTE (2006).

Com todas as perdas pela envolvente exterior calculadas passou-se para o cálculo das perdas associadas à renovação de ar e desta forma considerou-se que a ventilação do edifício seria considerada como sendo apenas do tipo natural e que cumpriria a NP 1037-1 (2002), garantindo-se uma renovação horária do ar de  $0,6h^{-1}$ .

#### Ganhos térmicos

Os vãos envidraçados têm um papel muito importante, pois a grande fatia dos ganhos térmicos advém destes. O seu cálculo é feito através da utilização dos seguintes fatores solares:

- Fator de orientação,  $X()$ ;
- Fator solar do vão envidraçado,  $g_{\perp}$ ;
- Fator de sombreamento do horizonte,  $F_h$ ;
- Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrepostos ao vão envidraçado,  $F_o$ ;
- Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ou sobrepostos ao vão envidraçado,  $F_v$ ;
- Fator solar,  $F_s$ ;
- Fracção envidraçada,  $F_g$ ;
- Fator de correção da selectividade angular dos envidraçados,  $F_w$ .

No caso do fator de sombreamento do horizonte, considerou-se para o valor do ângulo do horizonte ( $\alpha$ )  $20^\circ$ , considerando o facto de que a casa está inserida em ambiente campestre.

Em relação ao fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ou sobrepostos ao vão envidraçado,  $F_v$ , adota-se o valor 1, pois considera-se inexistente este tipo de sombreamento, mais um ponto que pode ser alterado num estudo futuro, ou seja, incluir sombreamentos verticais.

Já o fator de correção da selectividade angular dos envidraçados,  $F_w$ , foi assumido como sendo 0,9, pois este valor é dado para um envidraçado do tipo duplo, sendo esta a solução construtiva adaptada para a moradia de referência.

---

<sup>5</sup> Os valores foram retirados do ITE50 (Santos, Matias; 2006) e calculados manualmente como forma de verificação.

Apenas se especificaram três dos oito fatores anteriormente referidos, pois apenas para estes foi necessário assumir determinados pressupostos para o cálculo dos ganhos térmicos pelos vãos envidraçados, sendo que para a obtenção dos valores finais de todos os fatores é necessária a consulta dos quadros dos anexos do RCCTE.

### **Cálculo das necessidades**

Depois de expostos os pressupostos descritos para o cálculo das perdas e dos ganhos estes puderam ser calculados, o que permite assim introduzir os pressupostos relativos ao cálculo das necessidades.

No cálculo das necessidades de aquecimento, é necessário utilizar o valor dos graus-dias no local, usualmente esse valor é retirado do RCCTE, mas neste caso optou-se por se calcular manualmente através dos dados dos ficheiros climáticos do *EnergyPlus*, permitindo assim um maior rigor nos cálculos.

Para o cálculo das necessidades energéticas para produção de águas quentes sanitárias (AQS) é necessário assumir determinados pressupostos, relativos aos equipamentos existentes para o aquecimento de águas. Atualmente é previsto em decreto-lei a existência obrigatória de painéis solares nas habitações, uma medida de combate ao consumo energético. Dado que se trata de uma moradia unifamiliar estipulou-se que será habitada por quatro utilizadores, o que de acordo com o RCCTE implica uma área útil de 4m<sup>2</sup> de captação de sistemas de coletores solares (1 m<sup>2</sup> por cada utilizador). Com a informação anterior pode obter-se o valor da energia solar obtida através do sistema de coletores solares, estipulando-se que se utilizaria um sistema do tipo B, que consiste num sistema tipo “kit”. O valor de energia solar fornecido foi obtido através da nota técnica NT-SCE-01 (2009). Outro pressuposto tomado foi o relativo à eficiência de conversão do sistema de produção de AQS ( $\eta_a$ ), que neste caso optou-se pela situação mais desfavorável, ou seja, um esquentador, o valor relativo a esta opção pode ser retirado do RCCTE.

### **3.4.3 Aplicação do *EnergyPlus***

Este ponto, tal como o anterior, tem o objetivo de indicar e explicar quais os pressupostos assumidos na simulação com o *EnergyPlus*, tendo-se já admitido que o edifício é regulamentar segundo a legislação nacional.

A primeira simulação feita representará as condições iniciais tal como foi inserido nas folhas de cálculo do RCCTE; seguem-se as otimizações por forma a atingir-se um balanço energético nulo.

Em comparação com o RCCTE esta simulação é muito mais precisa, pois tem em consideração mais fatores que o RCCTE. É levada em linha de conta a separação dos ganhos internos provocados pelas luzes, equipamentos e presença dos ocupantes, enquanto que no RCCTE são englobados numa única parcela.

No caso do *EnergyPlus* os pressupostos assumidos dependem do campo a preencher, o Quadro 3.3 resume os pressupostos tidos em conta para cada campo.

Todos os pressupostos foram escolhidos tendo em conta as possibilidades existentes no programa *EnergyPlus* (2010), estas estão catalogadas e explicadas no seu manual (E.I.A., 2010).

**Quadro 3.3** – Pressupostos assumidos na simulação da moradia de referência com o *EnergyPlus*.

<b>Campo</b>	<b>Pressuposto</b>
<b>Controlos de simulação</b>	Neste campo é importante especificar que o programa simule apenas através do ficheiro climático escolhido e do especificado no período de simulação ( <i>RunPeriod</i> ).
<b>Edifício</b>	Assume-se inicialmente que o edifício faz um ângulo nulo em relação ao eixo norte. Note-se que o edifício está localizado numa zona descampada, ou seja, não existindo obstáculos à radiação solar e à exposição das condições do vento.
<b>Cálculo do Sombreamento</b>	Assumiu-se uma duração de vinte dias e a sobreposição de quinze mil sombras para a simulação do cálculo do sombreamento.
<b>Algoritmo da Convecção Superficial (Interior do Edifício)</b>	O programa vem com a possibilidade de escolha de cinco algoritmos diferentes para o cálculo das transferências de calor por convecção que ocorrem na face interior de todas as superfícies do edifício. Escolheu-se o algoritmo baseado no TARP, que calcula através da convecção natural variável com base na diferença de temperatura, baseado no ASHREA e nos estudos de Walton (1983). (EIA, 2010)
<b>Algoritmo da Convecção Superficial (Exterior do Edifício)</b>	O programa dá a possibilidade de escolha, este tem na sua base de dados cinco algoritmos diferentes. Escolheu-se o algoritmo baseado no DOE-2, que faz a correlação com base nas medições de Klems e Yazdanian (1994) para as superfícies ásperas. (EIA, 2010)
<b>Algoritmo do Balanço de Calor</b>	Este campo impõe ao programa o algoritmo a utilizar em todos os cálculos da simulação em que a transferência de calor e a humidade sejam importantes. Optou-se por <i>ConductionTransferFunction</i> , pois não toma em consideração outros tipos de transferência de calor, apenas as transferências por condução.
<b>Espaço de Tempo para Iterar (<i>Timestep</i>)</b>	<i>Timestep</i> é o número de vezes que o programa itera dentro de uma hora, a escolha feita para este campo tem implicações importantes para a modelagem e precisão o tempo total que leva para executar uma simulação. Optou-se por quatro vezes, o que implica iterações de um quarto de hora, esta escolha deve-se ao facto de se tratar de uma simulação sem sistema de HVAC. Caso se opte por colocar um sistema de HVAC substituiu-se o valor por seis.
<b>Período de Simulação</b>	Criaram-se dois períodos de simulação, um para a estação de arrefecimento e um para a estação de aquecimento. As durações foram calculadas de acordo com o que é dito no Anexo II, Definições, pontos bb) e cc) do RCCTE e tendo em conta os dados dos ficheiros climáticos presentes na base de dados do <i>EnergyPlus</i> . Deve ter-se em atenção que a duração de cada estação varia de acordo com a zona climática em estudo. Refere-se que o número de Graus-Dias e a duração da estação de aquecimento calculados com os dados do <i>EnergyPlus</i> diferem dos valores presentes no Quadro 3.1.
<b>Horários de Utilização</b>	Assumiram-se, tratando-se da pior situação, que os horários de utilização, das luzes e dos equipamentos, e do próprio edifício serão permanentes.
<b>Material de Sombreamento do Envidraçado</b>	Neste campo especifica-se o tipo de sombreamento fornecido, neste caso por um estore veneziano. Considerou-se que o estore veneziano utilizado tem uma baixa reflectância e o sombreamento das janelas é de transparência média, o que no caso do <i>EnergyPlus</i> representa um sombreamento do tipo: <i>LOW REFLECT - MEDIUM TRANS SHADE</i> .
<b>Propriedades dos Envidraçados: Controlo do Sombreamento</b>	Este campo especifica qual o tipo de sombreamento utilizado e como é ativado. Optou-se por sombreamento pelo exterior proporcionado por persianas próprias, sendo que o controlo escolhido implica que se a temperatura exterior for inferior a 25°C durante a noite os estores serão ativados, caso contrário não, durante o dia nunca estarão ativados, de acordo com o <i>EnergyPlus</i> este controlo é denominado por: <i>OnNightIfLowOutdoorTempAndOffDay</i> .

<b>Utilizadores</b>	Neste campo especificou-se o número de pessoas, neste caso quatro, como já foi referido e os seus hábitos de utilização do edifício, permanente, referido nos horários.
<b>Luzes</b>	O pressuposto que se assumiu neste campo foi o valor de consumo das luzes, que neste caso foi considerado 2 W/m <sup>2</sup> .
<b>Equipamentos</b>	Tal como no caso das luzes assumiu-se que o consumo dos equipamentos será de 2 W/m <sup>2</sup> .
<b>Renovações Horárias</b>	Considerou-se que a renovação do ar seria do tipo natural e que teria o valor mínimo exigido pela legislação em vigor, ou seja, 0,6 h <sup>-1</sup> .

### Cálculo das Necessidades Energéticas Totais

As necessidades energéticas totais foram calculadas de acordo com o estipulado no RCCTE (2006), através da seguinte expressão:

$$N_{tc} = 0,1 \times \frac{N_{ic}}{\eta_i} \times F_{pui} + 0,1 \times \frac{N_{vc}}{\eta_v} \times F_{puv} + N_{ac} \times F_{pua} \quad [8]$$

Em que:

- $N_{tc}$  – Necessidades globais em energia primária;
- $N_{ic}$  – Necessidades de aquecimento em energia útil;
- $N_{vc}$  – Necessidades de arrefecimento em energia útil;
- $N_{ac}$  – Necessidades de produção de AQS em energia útil;
- $\eta_i$  – A eficiência nominal dos equipamentos para aquecimento;
- $\eta_v$  – A eficiência nominal dos equipamentos para arrefecimento;
- $F_{pui}$  – O fator de conversão de energia útil para energia primária – aquecimento;
- $F_{puv}$  – O fator de conversão de energia útil para energia primária – arrefecimento;
- $F_{pua}$  – O fator de conversão de energia útil para energia primária – AQS.

As simulações realizadas através do *EnergyPlus* fornecerão os valores conceptualmente correspondentes ao  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ .

No Quadro 3.4 estão especificados os fatores de conversão de energia útil em energia primária, retirados do RCCTE e do documento Princípios para Edifícios de Balanço Energético Quase Nulo (Atanasiu, 2011). Os primeiros estão em quilograma de energia petrolífera e os segundos em quilograma de energia elétrica. Para os cálculos das necessidades energéticas totais utilizou-se apenas os fatores de conversão para energia primária elétrica.

**Quadro 3.4** – Fatores de conversão de energia útil em energia primária

<b>Fator de conversão de energia útil para energia primária</b>	<b>kgep/ kWh</b>	<b>kWh/kWh</b>
$F_{pui}$	0,290	2,60
$F_{puv}$	0,290	2,60
$F_{pua}$	0,086	1,00

#### **3.4.4 Necessidades energéticas da moradia de referência (Valores Iniciais)**

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos através da aplicação do RCCTE bem como dos resultados obtidos através do *EnergyPlus*, verificando-se assim a validade regulamentar da moradia de referência para cada zona climática estudada. É de salientar que, apesar de existirem diferenças entre

os valores obtidos através dos dois métodos de cálculo, tal deve-se às diferentes metodologias de cálculo e pressupostos admitidos para cada uma. Contudo, é de referir ainda que as diferenças entre os resultados não ultrapassam os 33%, facto que aponta para uma concordância aceitável. Refere-se que no caso das necessidades de arrefecimento da cidade do Porto a diferença é de 90%, esta diferença tão acentuada não foi explicada pois não se detetou nenhum erro nos dados e na simulação.

### **Bragança**

As necessidades de aquecimento, arrefecimento, para produção de águas quentes sanitárias e as energéticas totais, obtidas através do cálculo com o RCCTE e da simulação com o *EnergyPlus* verificaram-se regulamentares, tal como demonstra o Quadro 3.5.

**Quadro 3.5** – Valores das necessidades para a cidade de Bragança, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica.

Necessidades	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>		Limite Regulamentar	Energia Primária (eletricidade)	
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	88,89	68,98	<	133,17	$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,29	1,54	<	18,00	$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	<	67,58	$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27
$N_{tc}$ (kgep/m <sup>2</sup> .ano)	7,43	6,85	<	10,48	$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34

### **Évora**

Em relação à cidade de Évora, tal como se realizou para a cidade de Bragança, as necessidades estão representadas no Quadro 3.6. Pode-se verificar por este que estas são regulamentares, ou seja, estão abaixo dos valores máximos permitidos.

**Quadro 3.6** - Valores das necessidades para a cidade de Évora, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica.

Necessidades	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>		Limite Regulamentar	Energia Primária (eletricidade)	
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,59	42,03	<	179,36	$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,38	4,09	<	1,34	$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	<	56,27	$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24
$N_{tc}$ (kgep/m <sup>2</sup> .ano)	6,35	5,92	<	74,34	$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53

### **Faro**

Tal como as duas cidades anteriores, os estudos realizados para a cidade de Faro vieram comprovar que a moradia de referência é regulamentar, pois as suas necessidades são inferiores às máximas permitidas pela legislação nacional, esses valores estão indicados no Quadro 3.7.



**Quadro 3.7** - Valores das necessidades para a cidade de Faro, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica.

Necessidades	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>		Limite Regulamentar	Energia Primária (eletricidade)	
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	25,78	19,22	<	44,21	$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	8,25	5,59	<	32,00	$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	<	67,58	$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29
$N_{tc}$ (kgep/m <sup>2</sup> .ano)	5,50	5,28	<	9,81	$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77

### Lisboa

A moradia de referência implantada em Lisboa também se demonstra regulamentar, tanto as necessidades de aquecimento, como as de arrefecimento, produção de águas quentes sanitárias e as energéticas totais são inferiores, quer calculadas através do RCCTE, quer obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, às máximas permitidas pela legislação nacional. No Quadro 3.8 indicam-se quais os valores de para cada ponto referido no parágrafo anterior.

**Quadro 3.8** - Valores das necessidades para a cidade de Lisboa, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica.

Necessidades	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>		Limite Regulamentar	Energia Primária (eletricidade)	
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	39,88	32,59	<	62,17	$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,35	3,42	<	32,00	$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	<	67,58	$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24
$N_{tc}$ (kgep/m <sup>2</sup> .ano)	5,95	5,73	<	9,97	$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01

### Porto

Tal como todas em todas as cidades anteriores, na cidade do Porto a moradia de referência também se encontra numa situação regulamentar. O Quadro 3.9 expõe os valores de cada necessidade, quer as calculadas através do RCCTE, quer as simuladas pelo *EnergyPlus* quer as máximas regulamentares.

**Quadro 3.9** - Valores das necessidades para a cidade do Porto, calculadas através do RCCTE, obtidas através da simulação com o *EnergyPlus*, as máximas permitidas pela legislação em vigor e as em energia primária elétrica.

Necessidades	RCCTE	<i>EnergyPlus</i>		Limite Regulamentar	Energia Primária (eletricidade)	
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,04	42,67	<	97,31	$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,90	0,08	<	18,00	$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,07
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	<	67,58	$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96
$N_{tc}$ (kgep/m <sup>2</sup> .ano)	6,50	6,14	<	10,16	$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06



# CAPÍTULO 4 - Estudo de Otimização

## 4.1 Considerações iniciais

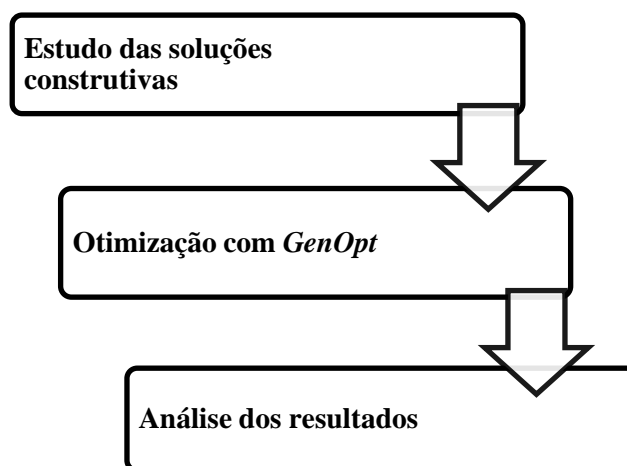
Este capítulo será dedicado ao estudo de otimização do comportamento energético do edifício em estudo. Este foi abordado na vertente passiva, procurando obter o conjunto de valores de coeficientes de transmissão térmica ideais através da escolha de soluções construtivas mais eficientes e do estudo da espessura de isolamento térmico aplicado, das dimensões dos vãos envidraçados e das palas de sombreamento, do número de renovações horárias e da localização do edifício ótimos, procurando a satisfazer as necessidades energéticas com o mínimo de dispêndio de energia.

Tendo em conta este objetivo foram estudadas diversas soluções construtivas de paredes exteriores, pavimentos, coberturas e vãos envidraçados por forma a procurar valores ótimos para o conjunto de valores analisados.

O estudo de otimização foi dividido em três fases, nomeadamente:

- 1º Fase.** Estudo prévio de soluções construtivas de utilização corrente para o tipo de edifício e zona climática específico em questão;
- 2º Fase.** Otimização dos parâmetros com o auxílio do algoritmo Hooke-Jeeves (*GenOpt*), considerando neste ponto as alterações da 1ª Fase;
- 3º Fase.** Análise dos resultados obtidos.

A Figura 4.1 demonstra de forma prática e sucinta os passos anteriormente descritos.



**Figura 4.1** – Diagrama das fases a decorrer na otimização.

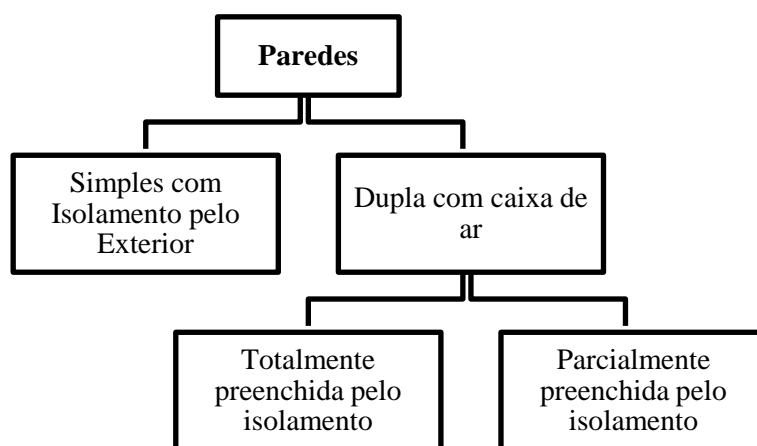
Apresenta-se de seguida o estudo de otimização realizado, em conjunto com a metodologia utilizada, os pressupostos considerados, os resultados obtidos e a respetiva análise.

## 4.2 1ª Fase - Estudo prévio de soluções construtivas

Tal como referido anteriormente, a primeira alteração incidiu sobre a envolvente sendo esta uma das condicionantes da eficiência energética do edifício. Assim os componentes que sofreram alterações em termos de escolha de soluções construtivas foram as paredes exteriores, a cobertura, o pavimento e os vãos envidraçados. O estudo prévio das soluções construtivas permite analisar as soluções escolhidas procurando encontrar a que melhor se adequa para cada zona climática, sem alterar a espessura do isolamento térmico, de forma a diminuir as necessidades energéticas. Apresentam-se de seguida os conjuntos de soluções adotadas para cada elemento.

### 4.2.1 Paredes Exteriores

Indica-se na Figura 4.2 os diferentes tipos de soluções construtivas utilizadas para otimizar as paredes exteriores.



**Figura 4.2** – Diagrama de possíveis tipos de paredes a aplicar.

De acordo com o indicado, constata-se que existem três tipos diferentes de soluções construtivas testadas. A cada solução construtiva foi atribuído um código para um mais fácil acompanhamento ao longo do trabalho, o mesmo se fez para as restantes soluções construtivas estudadas.

Como nesta fase apenas se pretendia averiguar qual a melhor solução construtiva a aplicar para cada zona climática independentemente da espessura de isolamento térmico utilizada, esta foi mantida igual à da solução inicial, sendo a espessura alterada na segunda fase da otimização com o auxílio do *GenOpt*.

Como o valor do coeficiente de transmissão térmica pode não fornecer uma imagem completa em todas as análises foram comparados os valores das necessidades energéticas. Assim o Quadro 4.1, que se segue, descreve cada uma das três soluções construtivas estudadas e indica qual o respetivo valor do coeficiente de transmissão térmica.

É de referir que a constituição de cada solução construtiva é indicada começando pelas camadas exteriores.

Para cada zona climática foi simulado o comportamento térmico da moradia de referência com o *EnergyPlus* alterando as soluções construtivas. Apresenta-se de seguida os resultados obtidos para cada zona climática.

**Quadro 4.1** – Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica.

Solução construtiva	Código	Constituição	U
<b>Parede simples com isolamento pelo exterior</b>	PSIE	Reboco de argamassa pré-doseada com 15 mm, Isolamento térmico do tipo XPS com 4 cm, Alvenaria de tijolo de 25 cm, Estuque tradicional com 15 mm	0,53 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Parede dupla com isolamento a preencher na totalidade a caixa de ar</b>	PDIC	Reboco de argamassa pré-doseada com 15 mm, Alvenaria de tijolo de 15 cm, Isolamento térmico do tipo XPS com 4 cm, Alvenaria de tijolo de 11 cm, Estuque tradicional com 15 mm	0,52 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Parede dupla com isolamento a preencher parcialmente a caixa de ar</b>	PDINC	Reboco de argamassa pré-doseada com 15 mm, Alvenaria de tijolo de 15 cm, Caixa de ar com 25 mm, Isolamento térmico do tipo XPS com 4 cm, Alvenaria de tijolo de 11 cm, Estuque tradicional com 15 mm	0,48 W/m <sup>2</sup> . °C

### Bragança

Os valores obtidos, das necessidades de energia primária para Bragança são indicados no Quadro 4.2. Assim como se pode observar a partir do Quadro 4.3 a solução construtiva que proporciona melhores resultados é a correspondente a uma parede dupla com isolamento a preencher parcialmente a caixa de ar (PDINC).

**Quadro 4.2** – Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.

Necessidades	Inicial	PSIE	PDIC	PDINC
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36	183,66	182,14	176,65
$N_{ve}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34	1,30	1,40	1,38
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	56,27	56,27
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34	74,77	74,62	74,01

**Quadro 4.3** – Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	PDIC		PDINC		PSIE	
Análises	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)
<b>Inicial</b>	4828,80	107,95	4828,80	107,95	4828,80	107,95
<b>1ª Fase</b>	4903,65	113,13	4756,08	111,29	4944,56	105,29
<b>Diferença</b>	74,85	5,18	-72,72	3,34	115,76	-2,66
<b>Balanco</b>	+80,02		-69,38		+113,11	

A título de exemplo explica-se a metodologia de cálculo para a escolha da solução que melhor se adequa à cidade de Bragança. A solução construtiva PDIC obteve uma diferença positiva para as necessidades de aquecimento e de arrefecimento, ou seja, um aumento de 74,85 kWh/ano e de 5,18

kWh/ano, respetivamente (Linha: Diferença), o que implica que esta solução aumenta em 80,02 kWh/ano as necessidades energéticas (Linha: Balanço).

### Évora

O Quadro 4.4 apresenta os valores das necessidades energéticas obtidas para a cidade de Évora. De acordo com o cálculo do balanço das variações entre a fase inicial e a primeira fase do estudo de optimização, presentes no Quadro 4.5. A solução construtiva ótima é uma parede dupla com isolamento a preencher parcialmente a caixa de ar (PDNIC).

**Quadro 4.4** - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.

Necessidades	Inicial	PSIE	PDIC	PDINC
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28	112,88	111,88	107,64
$N_{ve}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55	3,57	3,67	3,59
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	54,24	54,24
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53	65,89	65,80	65,37

**Quadro 4.5** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	PDIC		PDNIC		PSIE	
Análises	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)
Inicial	2942,22	286,51	2942,22	286,51	2942,22	286,51
1ª Fase	3012,04	296,68	2897,89	290,02	3038,95	288,04
Diferença	69,82	10,17	-44,33	3,51	96,73	1,53
Balanço	+79,99		-40,82		+98,26	

### Faro

**Quadro 4.6** - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.

Necessidades	Inicial	PSIE	PDIC	PDINC
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96	54,56	53,86	51,75
$N_{ve}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84	5,29	5,50	5,42
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	54,29	54,29
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77	60,27	60,23	60,01

A solução ótima para a cidade de Faro é uma parede dupla com a caixa de ar parcialmente preenchida com isolamento térmico (PDNIC). As necessidades energéticas estão apresentadas no Quadro 4.6, sendo que no Quadro 4.7 apresenta-se o balanço das variações que levaram à escolha da solução construtiva.

**Quadro 4.7** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	PDIC		PDNIC		PSIE	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	1345,08	391,06	1345,08	391,06	1345,08	391,06
1ª Fase	1449,95	444,45	1393,20	437,82	1468,83	427,16
Diferença	104,87	53,39	48,12	46,76	123,75	36,10
Balanco	+158,26		+94,89		+159,85	

### Lisboa

A cidade de Lisboa tem os valores das necessidades energéticas obtidos apresentados no Quadro 4.8. De acordo com o Quadro 4.9 a solução construtiva que apresenta melhores resultados é uma parede dupla com isolamento a preencher parcialmente a caixa de ar (PDINC).

**Quadro 4.8** - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.

Necessidades	Inicial	PSIE	PDIC	PDINC
N <sub>ic</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74	87,11	86,09	83,02
N <sub>ve</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96	2,86	2,96	2,95
N <sub>ac</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	55,24	55,24
N <sub>tc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01	64,24	64,15	63,84

**Quadro 4.9** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	PDIC		PDNIC		PSIE	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	2281,49	239,35	2281,49	239,35	2281,49	239,35
1ª Fase	2317,92	239,40	2235,12	238,46	2345,32	231,34
Diferença	36,43	0,05	-46,37	-0,89	63,83	-8,00
Balanco	+36,49		-47,26		+55,82	

### Porto

Em relação à cidade do Porto os valores das necessidades em energia primária obtidos foram os que abaixo se descrevem no Quadro 4.10. Os valores dos balanços presentes no Quadro 4.11 indicaram que a solução construtiva ótima seria uma parede dupla com isolamento a preencher parcialmente a caixa de ar (PDNIC).

Sabe-se que usualmente a melhor solução a aplicar num edifício é uma parede com isolamento pelo exterior, pois este tipo de sistema apresenta grandes diminuições das perdas através das pontes térmicas. Neste caso de estudo, dado que se trata de um estudo inicial, feito de forma básica para testar a utilização do programa *GenOpt* aplicado ao estudo de soluções de otimização, não foram tidas em conta as pontes térmicas, o que leva a que a existência de uma parede dupla com caixa de ar parcialmente preenchida seja a melhor solução.

**Quadro 4.10** - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com a envolvente opaca, paredes, alteradas.

Necessidades	Inicial	PSIE	PDIC	PDINC
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94	114,31	113,01	109,37
$N_{ve}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,07	0,050	0,07	0,07
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	56,96	56,96
$N_{tc}$ kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06	68,40	68,27	67,90

**Quadro 4.11** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	PDIC		PDNIC		PSIE	
Análises	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ve}$ (kWh/ano)
Inicial	2986,83	5,70	2986,83	5,70	2986,83	5,70
1ª Fase	3042,64	5,97	2944,45	5,95	3077,61	4,00
Diferença	55,81	0,27	-42,38	0,25	90,78	-1,70
Balanco	+56,08		-42,13		+89,08	

## 4.2.2 Coberturas

A Figura 4.3 mostra o diagrama desenhado para as coberturas consideradas para este estudo. Foram analisadas dois tipos de cobertura, a tradicional e a invertida. De forma semelhante ao estudo realizado anteriormente para as paredes realizou-se o estudo das soluções construtivas das coberturas. O Quadro 4.12 descreve as soluções construtivas estudadas e indica o respetivo valor do coeficiente de transmissão térmica. As soluções construtivas estão descritas começando pela camada exterior.

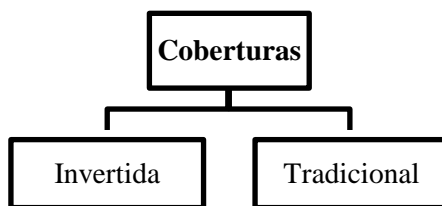
**Quadro 4.12** – Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica.

Solução construtiva	Código	Constituição	U
<b>Cobertura invertida</b>	CI	Lajetas de 35 mm, Geotextil com 1 cm, Isolamento térmico do tipo lã mineral com 8 cm, Membranas de impermeabilização com 1 cm, Camada de forma com 10 cm, Laje de betão armado com 15 cm, Argamassa pré-doseada com 15 mm.	0,39 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Cobertura tradicional</b>	CT	Lajetas de 35 mm, Geotextil com 1 cm, Membranas de impermeabilização com 1 cm, Camada de forma com 10 cm, Isolamento térmico do tipo lã mineral com 8cm, Película de polietileno de alta densidade com 1 mm, Laje de betão armado com 15 cm, Argamassa pré-doseada com 15mm.	0,39 W/m <sup>2</sup> .°C

Com recurso ao *EnergyPlus* foi simulado o comportamento térmico da moradia de referência inserida em cada zona climática com as diferentes soluções construtivas por forma a poder-se comparar,



analisar e escolher qual a que melhor se adequa a cada zona climática. De seguida mostram-se os resultados obtidos.



**Figura 4.3** – Diagrama de possíveis tipos de coberturas a aplicar.

### **Bragança**

Os valores obtidos das necessidades energéticas para a moradia de referência implantada em Bragança são os apresentados no Quadro 4.13. De acordo com os dados do Quadro 4.14 a cobertura que promove melhores resultados é a do tipo tradicional (CT).

**Quadro 4.13** - Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas.

Necessidades	Inicial	CI	CT
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36	184,07	183,69
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34	0,86	0,92
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	56,27
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34	74,76	74,73

**Quadro 4.14** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	Cobertura Tradicional		Cobertura Invertida	
Análises	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{ic}$ (kWh/ano)	$N_{vc}$ (kWh/ano)
Inicial	4828,80	4828,80	4828,80	107,95
1ª Fase	4945,52	4945,52	4955,70	69,39
Diferença	116,72	116,72	126,90	-38,56
Balanco	+82,97		+88,34	

### **Évora**

Os valores obtidos estão apresentados no Quadro 4.15, o Quadro 4.16 apresenta os valores dos balanços por cada solução construtiva, de acordo com estes a solução ótima é a cobertura invertida.

**Quadro 4.15** - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas.

Necessidades	Inicial	CI	CT
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28	114,89	114,74
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55	2,36	2,46
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	54,24
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53	65,97	65,96

**Quadro 4.16** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	Cobertura Tradicional		Cobertura Invertida	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	2942,22	286,51	2942,22	286,51
1ª Fase	3089,21	198,39	3093,22	190,72
Diferença	146,99	-88,12	151,00	-95,79
Balanço	+58,87		+52,22	

## Faro

Os valores obtidos para as necessidades energéticas para a moradia de referência implantada em Faro são os apresentados no Quadro 4.17. A análise dos balanços das variações de cada solução, presentes no Quadro 4.18 levou à escolha de uma cobertura invertida (CI).

**Quadro 4.17** - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas.

Necessidades	Inicial	CI	CT
N <sub>ic</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96	55,71	55,55
N <sub>ve</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84	3,47	3,61
N <sub>ac</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	54,29
N <sub>tc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77	60,21	60,21

**Quadro 4.18** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	Cobertura Tradicional		Cobertura Invertida	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	1345,08	391,06	1345,08	391,06
1ª Fase	1495,61	291,51	1499,85	280,15
Diferença	150,53	-99,55	154,77	-110,91
Balanço	+50,98		+43,87	

## Lisboa

Os resultados obtidos para a cidade de Lisboa apresentam-se no Quadro 4.19. De acordo com os dados do Quadro 4.20 a escolha ótima será uma cobertura invertida (CI).

**Quadro 4.19** - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas.

Necessidades	Inicial	CI	CT
N <sub>ic</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74	87,79	87,66
N <sub>ve</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96	1,77	1,88
N <sub>ac</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	55,24
N <sub>tc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01	64,20	64,19

**Quadro 4.20** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	Cobertura Tradicional		Cobertura Invertida	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	2281,49	239,35	2281,49	239,35
1ª Fase	2360,16	151,77	2363,50	142,63
Diferença	78,67	-87,58	82,01	-96,72
Balanco	-8,91		-14,71	

## Porto

As necessidades energéticas obtidas para a moradia de referência implantada na cidade do Porto, são as representadas no Quadro 4.21. O balanço das variações das necessidades energéticas, apresentados no Quadro 4.22, indicam que a cobertura tradicional é a opção ótima para a cidade do Porto.

**Quadro 4.21** - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com a envolvente opaca, coberturas, alteradas.

Necessidades	Inicial	CI	CT
N <sub>ic</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94	115,78	115,47
N <sub>ve</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,071	0,019	0,028
N <sub>ac</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	56,96
N <sub>tc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06	68,54	58,51

**Quadro 4.22** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

	Cobertura Tradicional		Cobertura Invertida	
Análises	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	N <sub>ve</sub> (kWh/ano)
Inicial	2986,83	5,70	2986,83	5,70
1ª Fase	3108,68	2,29	3117,13	1,54
Diferença	121,85	-3,41	130,30	-4,16
Balanco	+118,44		+126,14	

### 4.2.3 Pavimentos

Por não ser comum na construção nacional e considerando as ramificações possíveis que se poderiam tomar optou-se por manter a disposição construtiva do pavimento à exceção de uma alteração, foi considerado a existência de membranas de impermeabilização, obtendo-se assim:

- Camada de forma com 10 cm,
- Laje de betão armado com 25cm,
- Membranas de impermeabilização com 1 cm,
- Camada de forma com 10 cm,
- Ladrilho cerâmico de 1 cm.

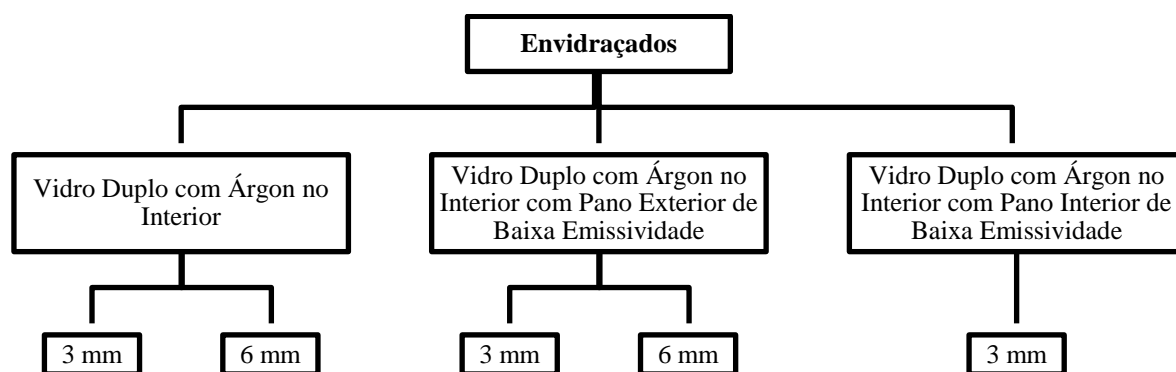
O valor do coeficiente de transmissão térmica da solução será de 1,59 W/m<sup>2</sup>.°C e os novos valores das necessidades energéticas são os que se apresentam no Quadro 4.23.

**Quadro 4.23** - Necessidades de cada cidade com a envolvente opaca, pavimento, alterado.

Necessidades	Bragança	Évora	Faro	Lisboa	Porto
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	17,97	10,99	5,29	8,47	11,14
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,14	0,37	0,56	0,30	0,01
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	54,24	54,29	55,24	56,96
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,38	65,61	60,13	64,01	68,10

#### 4.2.4 Envidraçados

Os vãos envidraçados são, de todos os elementos da fachada, os que maior número de opções têm, tal como o diagrama da Figura 4.4 apresenta.



**Figura 4.4** - Diagrama de possíveis tipos de envidraçados a aplicar.

Foram estudados cinco tipos diferentes de envidraçados, cada uma das soluções construtivas escolhidas está descrita no Quadro 4.24, incluindo o respetivo valor de coeficiente de transmissão térmica.

**Quadro 4.24** - Soluções construtivas e respetivo coeficiente de transmissão térmica.

Solução construtiva	Código	Constituição	U
<b>Vidro duplo puro de 3mm com árgon no interior</b>	EC3AC3	Vidro puro de 3 mm, Espaço de ar de 13 mm preenchido com árgon, Vidro puro de 3 mm	2,56 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Vidro duplo puro de 6mm com árgon no interior</b>	EC6AC6	Vidro puro de 6 mm, Espaço de ar de 13 mm preenchido com árgon, Vidro puro de 6 mm	2,51 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Vidro duplo, pano exterior de baixa emissividade e pano interior puro, ambos de 3mm com árgon no interior</b>	EloEC3AC3	Vidro de baixa emissividade com capeamento metálico 3 mm, Espaço de ar de 13 mm preenchido com árgon, Vidro puro de 3 mm	1,51 W/m <sup>2</sup> .°C
<b>Vidro duplo, pano exterior de baixa emissividade e pano</b>	EloEC6AC6	Vidro de baixa emissividade com capeamento metálico 6 mm,	1,49 W/m <sup>2</sup> .°C

<b>interior puro, ambos de 6mm com árgon no interior</b>		Espaço de ar de 13 mm preenchido com árgon, Vidro puro de 6 mm	
<b>Vidro duplo, pano exterior puro e pano interior de baixa emissividade, ambos de 3mm com árgon no interior</b>	EloEC3AC3Rev	Vidro puro de 3 mm. Espaço de ar de 13 mm preenchido com árgon, Vidro de baixa emissividade com capeamento metálico na face exterior de 3 mm	1,51 W/m <sup>2</sup> .°C

### **Bragança**

Os valores obtidos, das necessidades energéticas para Bragança são os representados no Quadro 4.25. A análise dos valores dos balanços das variações das necessidades, presentes no Quadro 4.26, levou à escolha de um envidraçado com vidro duplo, pano exterior puro e pano interior de baixa emissividade, ambos de 3 mm com árgon no interior (EloEC3AC3Rev).

**Quadro 4.25** - Necessidades iniciais da cidade de Bragança e necessidades com os envidraçados alterados.

<b>Necessidades</b>	<b>Inicial</b>	<b>EC3AC3</b>	<b>EC6AC6</b>	<b>EloEC3AC3</b>	<b>EloEC6AC6</b>	<b>EloEC3AC3Rev</b>
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36	178,77	179,62	175,68	175,89	172,96
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34	1,40	1,37	1,20	1,19	1,28
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	56,27	56,27	56,27	56,27
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34	74,29	74,37	73,96	73,98	73,69

**Quadro 4.26** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

<b>Análises</b>		<b>Inicial</b>	<b>1ª Fase</b>	<b>Diferença</b>	<b>Balanco</b>
<b>EC3AC3</b>	$N_{ic}$ (kWh/ano)	4828,80	4812,92	-15,88	-10,38
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	107,95	113,45	5,50	
<b>EC6AC6</b>	$N_{ic}$ (kWh/ano)	4828,80	4835,87	7,07	+10,02
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	107,95	110,90	2,95	
<b>EloEC3AC3</b>	$N_{ic}$ (kWh/ano)	4828,80	107,95	-99,00	-110,43
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	4729,80	96,52	-11,43	
<b>EloEC6AC6</b>	$N_{ic}$ (kWh/ano)	4828,80	4735,43	-93,37	-105,20
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	107,95	96,12	-11,83	
<b>EloEC3AC3Rev</b>	$N_{ic}$ (kWh/ano)	4828,80	4656,49	-172,31	-176,53
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	107,95	103,72	-4,23	

## Évora

No Quadro 4.27 foram expostos os valores das necessidades energéticas obtidas para cada tipo de envidraçado.

**Quadro 4.27** - Necessidades iniciais da cidade de Évora e necessidades com os envidraçados alterados.

Necessidades	Inicial	EC3AC3	EC6AC6	EloEC3AC3	EloEC6AC6	EloEC3AC3Rev
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28	109,40	110,21	108,76	108,97	106,42
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55	3,66	3,61	3,26	3,25	3,42
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	54,24	54,24	54,24	54,24
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53	65,55	65,62	65,44	65,47	65,23

No Quadro 4.27 já se denota a marcação do envidraçado com vidro duplo, pano exterior puro e pano interior de baixa emissividade, ambos de 3 mm com argon no interior (EloEC3AC3Rev) como sendo a melhor solução construtiva a adotar para a cidade de Évora, tal opção baseia-se nos dados presentes no Quadro 4.28.

**Quadro 4.28** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

Análises		Inicial	1ª Fase	Diferença	Balanco
EC3AC3	$N_{ic}$ (kWh/ano)	2942,22	2945,45	3,23	+12,69
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	286,51	295,97	9,46	
EC6AC6	$N_{ic}$ (kWh/ano)	2942,22	2967,07	24,85	+ 29,85
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	286,51	291,52	5,01	
EloEC3AC3	$N_{ic}$ (kWh/ano)	2942,22	2928,12	-14,10	-37,35
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	286,51	263,25	-23,26	
EloEC6AC6	$N_{ic}$ (kWh/ano)	2942,22	2933,80	-8,42	-32,31
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	286,51	262,63	-23,88	
EloEC3AC3Rev	$N_{ic}$ (kWh/ano)	2942,22	2865,05	-77,17	-87,46
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	286,51	276,22	-10,29	

## Faro

As necessidades energéticas obtidas para a moradia de referência implantada na cidade de Faro estão apresentadas no Quadro 4.29. De acordo com os balanços das variações das necessidades energéticas, explícitos no Quadro 4.30, a melhor solução construtiva a aplicar na cidade de Faro é um envidraçado duplo com vidro de baixa emissividade com capeamento metálico na face exterior de 3 mm no pano exterior e vidro puro de 3 mm no pano interior e espaço de ar preenchido por argon (EloEC3AC3).

**Quadro 4.29** - Necessidades iniciais da cidade de Faro e necessidades com os envidraçados alterados.

Necessidades	Inicial	EC3AC3	EC6AC6	EloEC3AC3	EloEC6AC6	EloEC3AC3Rev
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96	52,63	53,14	52,81	52,94	51,35
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84	5,50	5,34	4,72	4,69	5,23
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	54,29	54,29	54,29	54,29
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77	60,10	60,14	60,04	60,05	59,92

**Quadro 4.30** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

Análises		Inicial	1ª Fase	Diferença	Balanço
EC3AC3	$N_{ic}$ (kWh/ano)	1345,08	1417,01	71,93	+125,15
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	391,06	444,28	53,22	
EC6AC6	$N_{ic}$ (kWh/ano)	1345,08	1430,61	85,53	+125,53
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	391,06	431,07	40,01	
EloEC3AC3	$N_{ic}$ (kWh/ano)	1345,08	1421,77	76,69	+66,56
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	391,06	380,93	-10,13	
EloEC6AC6	$N_{ic}$ (kWh/ano)	1345,08	1425,20	80,12	+67,64
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	391,06	378,58	-12,48	
EloEC3AC3Rev	$N_{ic}$ (kWh/ano)	1345,08	1382,61	37,53	+68,99
	$N_{vc}$ (kWh/ano)	391,06	422,52	31,46	

## Lisboa

Os valores obtidos das necessidades energéticas para cada tipo de envidraçado estão representados no Quadro 4.31. Os balanços das variações das necessidades energéticas, indicados no Quadro 4.32, apontam que a melhor solução construtiva seja um envidraçado com vidro duplo, pano exterior puro e pano interior de baixa emissividade, ambos de 3 mm com argon no interior (EloEC3AC3Rev).

**Quadro 4.31** - Necessidades iniciais da cidade de Lisboa e necessidades com os envidraçados alterados.

Necessidades	Inicial	EC3AC3	EC6AC6	EloEC3AC3	EloEC6AC6	EloEC3AC3Rev
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74	84,30	84,93	84,05	84,21	82,23
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96	2,98	2,85	2,36	2,33	2,74
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	55,24	55,24	55,24	55,24
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01	63,97	64,02	63,88	63,89	63,74

**Quadro 4.32** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

Análises		Inicial	1ª Fase	Diferença	Balanço
EC3AC3	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2281,49	2269,67	-11,83	-10,79
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	239,35	240,38	1,03	
EC6AC6	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2281,49	2286,65	5,16	-4,28
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	239,35	229,91	-9,44	
EloEC3AC3	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2281,49	2263,00	-18,49	-67,17
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	239,35	190,67	-48,68	
EloEC6AC6	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2281,49	2267,06	-14,43	-65,35
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	239,35	188,43	-50,91	
EloEC3AC3Rev	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2281,49	2214,01	-67,49	-85,33
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	239,35	221,51	-17,84	

## Porto

**Quadro 4.33** - Quadro das variações e balanços das necessidades energéticas para cada solução construtiva.

Análises		Inicial	1ª Fase	Diferença	Balanço
EC3AC3	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2986,83	2981,68	-5,15	-4,44
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	5,70	6,41	0,71	
EC6AC6	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2986,83	3005,22	18,39	+ 18,47
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	5,70	5,78	0,08	
EloEC3AC3	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2986,83	2951,76	-35,07	-36,91
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	5,70	3,86	-1,84	
EloEC6AC6	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2986,83	2957,87	-28,96	-30,93
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	5,70	3,73	-1,97	
EloEC3AC3Rev	N <sub>ic</sub> (kWh/ano)	2986,83	2884,09	-102,74	-103,45
	N <sub>vc</sub> (kWh/ano)	5,70	4,99	-0,71	

As necessidades energéticas resultantes da simulação da moradia de referência na cidade do Porto são apresentadas no Quadro 4.34. No Quadro 4.33 são indicados os valores dos balanços das variações das necessidades energéticas, pela leitura deste constata-se que a melhor solução construtiva é um envidraçado duplo com vidro puro de 3 mm no pano exterior e vidro de 3 mm de baixa emissividade



com capeamento metálico na face exterior do pano interior e espaço de ar preenchido por argon (EloEC3AC3Rev).

**Quadro 4.34** - Necessidades iniciais da cidade do Porto e necessidades com os envidraçados alterados.

Necessidades	Inicial	EC3AC3	EC6AC6	EloEC3AC3	EloEC6AC6	EloEC3AC3Rev
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94	110,75	111,62	109,64	109,86	107,12
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,06
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	56,96	56,96	56,96	56,96
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06	68,04	68,13	67,93	67,95	67,68

#### 4.2.5 Soluções construtivas otimizadas combinadas

Neste ponto a moradia de referência será simulada novamente, neste caso com a combinação das soluções construtivas ótimas estudadas para cada zona climática, apresentadas no ponto anterior. Para cada zona climática serão comparados os valores iniciais das necessidades energéticas com os obtidos com através da otimização das soluções construtivas combinadas.

##### Bragança

Para a cidade de Bragança foi possível, através das alterações da envolvente, diminuir as necessidades, quer da estação de aquecimento quer da estação de arrefecimento, tal como o Quadro 4.35 demonstra:

**Quadro 4.35** – Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Bragança e respetiva variação.

Necessidades	Iniciais	1ª Fase	Variação
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36	178,57	-0,79
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34	0,59	-0,75
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34	74,19	-0,15

##### Évora

**Quadro 4.36** - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Évora e respetiva variação.

Necessidades	Iniciais	1ª Fase	Variação
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28	112,33	+3,05
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55	1,80	-1,75
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53	65,66	+0,13

A cidade de Évora, ao contrário da cidade de Bragança, apenas teve diminuições nas necessidades de arrefecimento, sendo que as necessidades de aquecimento aumentaram. Os resultados da primeira fase da otimização estão indicados no Quadro 4.36.

### **Faro**

A diminuição das necessidades energéticas na estação de arrefecimento, tal como na cidade de Évora, foi a única registada, as necessidades de aquecimento sofreram um ligeiro aumento. Todos os dados estão presentes no Quadro 4.37.

**Quadro 4.37** - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Faro e respetiva variação.

<b>Necessidades</b>	<b>Iniciais</b>	<b>1ª Fase</b>	<b>Variação</b>
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96	55,54	+5,28
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84	1,67	-3,17
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77	60,01	+0,24

### **Lisboa**

Lisboa apenas tem diminuições nas necessidades de arrefecimento, conseguindo ter diminuições nas necessidades totais. O Quadro 4.38 expõe todos os dados anteriormente referidos.

**Quadro 4.38** - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Lisboa e respetiva variação.

<b>Necessidades</b>	<b>Iniciais</b>	<b>1ª Fase</b>	<b>Variação</b>
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74	85,33	+0,59
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96	0,74	-2,22
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01	63,85	-0,16

### **Porto**

**Quadro 4.39** - Valores das necessidades iniciais e após a primeira fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade do Porto e respetiva variação.

<b>Necessidades</b>	<b>Iniciais</b>	<b>1ª Fase</b>	<b>Variação</b>
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94	113,08	+2,14
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,07	0,00	-0,07
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06	68,27	+0,21

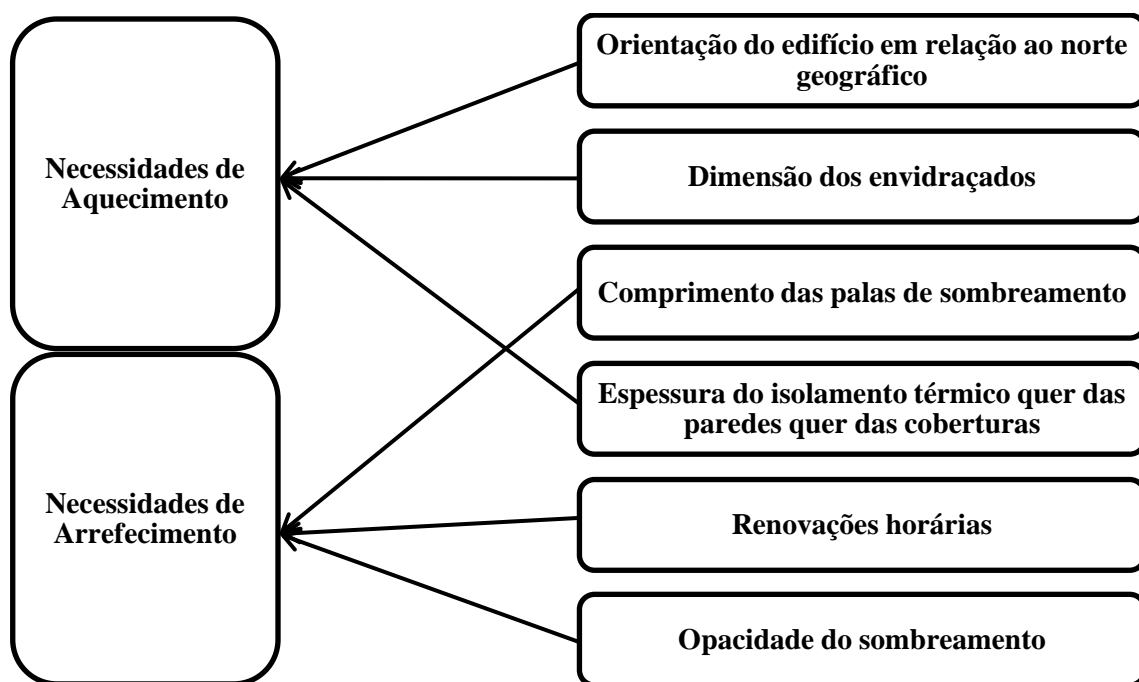
Apenas se conseguiu obter diminuições nas necessidades energéticas para a estação de arrefecimento, no Quadro 4.39 podem analisar-se os resultados da primeira fase de otimização e a variação obtida em relação às necessidades iniciais.

### 4.3 2ª Fase – Otimização com recurso ao *GenOpt*

Com a conclusão da primeira fase do estudo de otimização observou-se que os resultados obtidos não foram de encontro às expectativas do ponto de vista da diminuição das necessidades energéticas, razão pela qual se procedeu à segunda fase do estudo de otimização. Esta teve como objetivo a simulação do comportamento térmico da moradia de referência, considerando as alterações das soluções construtivas realizadas na primeira fase, através da alteração dos seguintes parâmetros:

- Orientação do edifício em relação ao norte geográfico;
- Dimensão dos vãos envidraçados;
- Comprimento das palas de sombreamento;
- Espessura do isolamento térmico das paredes e das coberturas;
- Número de renovações horárias;
- Opacidade do sombreamento.

O diagrama da Figura 4.5 mostra que influência a alteração das variáveis tem sobre as necessidades de aquecimento e de arrefecimento, ou seja, assume-se, empiricamente, que as variáveis em questão irão influenciar positivamente as necessidades a que estão ligadas, mas sempre com a nota que não existe uma relação direta. No final deste capítulo a premissa em questão será justificada pelos resultados obtidos.



**Figura 4.5** – Diagrama de relação entre as necessidades de aquecimento e arrefecimento com as variáveis complexas estudadas através do *GenOpt*.

#### 4.3.1 Variáveis estudadas

Tal como indicado na secção 3.3.2 a ferramenta *GenOpt* permite ser configurada para analisar um conjunto elevado de parâmetros a otimizar. Neste trabalho o estudo de otimização incidiu sobre seis

variáveis, representados no diagrama da Figura 4.5. Note-se que, devido a imposições geométricas e à necessidade de um estudo mais pormenorizado, existiu a necessidade de cada variável ser estudada em conformidade criando uma família de variáveis secundárias, ficando-se com um total de vinte e duas subvariáveis para a realização do estudo de otimização. No Quadro 4.40 estão descritos os conjuntos das variáveis e respectivas variáveis secundárias. Cada família de variáveis e respetivas variáveis secundárias serão descritas de seguida.

**Quadro 4.40** - Discretização das variáveis complexas estudadas.

<b>Variáveis Complexas</b>	Orientação do edifício em relação ao norte geográfico	Azimute
	Dimensão dos envidraçados	Dimensão horizontal dos envidraçados sul
		Dimensão horizontal dos envidraçados norte
		Dimensão horizontal dos envidraçados este
		Dimensão horizontal dos envidraçados oeste
	Comprimento das palas de sombreamento	Comprimento da pala sul
		Comprimento da pala este
		Comprimento da pala oeste
		Comprimento da pala norte
	Espessura do isolamento térmico quer das paredes quer da cobertura	Espessura do isolamento das paredes
		Espessura do isolamento da cobertura
	Renovações horárias	Renovação do ar na estação de arrefecimento durante a noite
		Renovação do ar na estação de arrefecimento durante o dia
		Renovação do ar na estação de aquecimento
	Opacidade do sombreamento	Opacidade da pala de sombreamento sul na estação de aquecimento
		Opacidade da pala de sombreamento sul na estação de arrefecimento
		Opacidade da pala de sombreamento norte na estação de aquecimento
		Opacidade da pala de sombreamento norte na estação de arrefecimento
		Opacidade da pala de sombreamento este na estação de aquecimento
		Opacidade da pala de sombreamento este na estação de arrefecimento
		Opacidade da pala de sombreamento oeste na estação de aquecimento
		Opacidade da pala de sombreamento oeste na estação de arrefecimento

### **Azimute**

O azimute é o ângulo que o edifício faz com o norte geográfico e considerando este dado como uma variável passível de alteração considerou-se a possibilidade de ser alterada com recurso ao *GenOpt*. A utilização da ferramenta permite um estudo fiável da posição da casa em relação ao eixo, o que permite optar pela melhor posição para absorção da radiação solar, o que, com um bom equilíbrio, ajuda à diminuição das necessidades de aquecimento e das necessidades de arrefecimento. A conjugação desta variável com a existência de palas de sombreamento e a alteração dos tamanhos dos envidraçados pode permitir grandes alterações positivas.

### **Dimensão horizontal do vão envidraçado**

Para este caso de estudo esta variável foi tida em consideração para estudar apenas as alterações provocadas pela variação da dimensão horizontal do envidraçado, nas necessidades energéticas. Como referido anteriormente, esta variável permite, em conjugação com outras, grandes benefícios na diminuição das necessidades energéticas.

Originalmente a dimensão horizontal, de todos os envidraçados, é de 1,40 m. A dimensão horizontal do envidraçado pode divergir de fachada para fachada, como tal existiu a necessidade de criar variáveis secundárias. Como o *GenOpt* trabalha as suas variáveis métricas em sistema de coordenadas, não é perceptível pelo intervalo qual o seu valor máximo de variação, desta forma tem-se:

- **Envidraçado sul:** O valor mínimo, por questões regulamentares, é de 1,40 e o valor máximo, por questões estruturais, será de 8,50 m;
- **Envidraçado norte:** Tal como no envidraçado anterior o valor mínimo da dimensão horizontal, por questões regulamentares, é de 1,40 m e o valor máximo, por questões estruturais, é de 9,60 m;
- **Envidraçado este:** O intervalo em que este parâmetro varia é, por questões regulamentares, entre 1,40 m e, por questões estruturais, de 6,60 m;
- **Envidraçado oeste:** Esta é a última variável métrica estudada em relação aos envidraçados, sendo que, como nas anteriores, a dimensão horizontal do envidraçado Oeste terá como valor mínimo, por questões regulamentares, 1,40 m e como valor máximo, por questões estruturais, é 6,60 m.

### **Comprimento das palas**

O estudo desta variável permitiu obter qual o comprimento ótimo das palas de sombreamento para cada um dos envidraçados existentes. O estudo do comprimento e da opacidade das palas de sombreamento permitiu conjugar qual o comprimento necessário e a relevância da sua existência por estação, por forma a garantir a máxima diminuição das necessidades energéticas.

O valor mínimo do comprimento da pala, por imposição do programa não pode ser nulo, assim desta forma optou-se por assumir como 0,10 m, o que na realidade indicará que a pala tem um comprimento desprezável, e o seu comprimento máximo será de 1,25 m, dimensão igual à altura dos vãos envidraçados.

### **Espessura do isolamento das paredes**

Esta variável é das de estudo mais comum uma vez que se pretende uma diminuição das necessidades energéticas de um edifício. Assim, e de acordo com a cidade estudada, a espessura do isolamento das paredes irá variar entre 3 e 8 cm, note-se que o valor inicial varia de acordo com a cidade a ser estudada, sendo que numas é 3 cm e noutras é 4 cm.

### **Espessura do isolamento da cobertura**

Tal como a variável anterior, esta estuda a espessura do isolamento aplicado, variando consoante a zona climática em que o edifício será inserido, entre 8 cm e 15 cm.

### **Renovação do ar**

O estudo da renovação de ar é um parâmetro muito importante pois, para além de permitir um ambiente saudável permite também a diminuição das necessidades de arrefecimento. Esta variável também foi desdobrada, desta forma tem-se:

- ***Na estação de arrefecimento durante a noite:*** Este parâmetro varia entre 1 e 3,33 e uma vez que este valor é um fator aplicado às renovações horárias, na realidade esta variação será entre  $0,6 \text{ h}^{-1}$  e  $2 \text{ h}^{-1}$ ;
- ***Renovação do ar na estação de arrefecimento durante o dia:*** Tal como a variável anterior esta irá variar entre  $0,6 \text{ h}^{-1}$  e  $2 \text{ h}^{-1}$ ;
- ***Renovação do ar na estação de aquecimento:*** Esta variável estuda as renovações horárias do ar para o dia inteiro, durante a estação de aquecimento. Ao contrário das duas variáveis anteriores, o seu valor mínimo é  $0,3 \text{ h}^{-1}$ , apesar de ir contra o regulamento nacional baseia-se em estudos realizados em países do norte da Europa, que indicam este valor como praticável e saudável. O valor máximo para esta variável mantém-se  $2 \text{ h}^{-1}$ .

### **Opacidade da pala de sombreamento**

O estudo da opacidade das palas de sombreamento permite diagnosticar a necessidade ou não da existência de palas de sombreamentos nas janelas. Esta variável teve de ser desdobrada em oito sub-variáveis, pois existia a necessidade de estudar individualmente a pala de cada janela e estudar a existência das palas em cada estação. A forma mais prática de estudar a necessidade de uma pala de sombreamento é através da sua opacidade, ou seja, o intervalo de estudo varia entre 0 e 1, em que o valor 0 significa que a pala é totalmente opaca, ou seja, existe pala, e o valor 1 significa que a pala é totalmente transparente, ou seja, não existe pala sobre o envidraçado.

O Quadro 4.41 resume os dados de cada variável descritos nos pontos anteriores e indica também a respetiva sigla utilizada no *GenOpt*.

#### **4.3.2 Pressupostos de utilização do *GenOpt***

O *GenOpt*, tal como qualquer ferramenta de simulação necessita de ficheiros que lhe indiquem o que deve fazer e como, os denominados ficheiros de *input*, para poder simular e obter resultados. Os ficheiros que irão conter a informação final, ou seja, os resultados da simulação denominam-se por ficheiros de *output*.

A introdução dos dados nos ficheiros de *input* requerem a interiorização de alguns pressupostos, pressupostos esses que serão descritos de seguida. Os ficheiros de *input* a utilizar são quatro: criam-se dois ficheiros de texto que o *GenOpt* irá ler por forma a poder realizar as iterações: o *Command* e o *OptWin7*; o ficheiro IDF original saído do *EnergyPlus* e uma cópia deste alterada de acordo com as variáveis a estudar denominada de *\_Template*. De seguida, explica-se para cada ficheiro mencionado os pressupostos tidos em conta para a otimização das variáveis neste estudo.

**Quadro 4.41** – Conjunto de variáveis, respetivas siglas e intervalo de variação.

<b>Variável</b>	<b>Código <i>GenOpt</i></b>	<b>Intervalo Variação</b>
Azimute	azimuth	$[-\infty; +\infty]$
Dimensão horizontal dos envidraçados sul	a	[3,95; 10,05]
Dimensão horizontal dos envidraçados norte	b	[1,45; 9,65]
Dimensão horizontal dos envidraçados este	c	[2,85; 8,05]
Dimensão horizontal dos envidraçados oeste	e	[1,45; 6,65]
Comprimento da pala sul	d	[0,1; 1,25]
Comprimento da pala norte	f	[8,35; 9,50]
Comprimento da pala este	g	[11,35; 12,50]
Comprimento da pala oeste	h	[0,1; 1,25]
Espessura do isolamento das paredes	ep	[0,3; 0,8]
Espessura do isolamento da cobertura	ec	[0,8; 0,15]
Renovação do ar na estação de arrefecimento durante a noite	rphv	[1,00; 3,33]
Renovação do ar na estação de arrefecimento durante o dia	rphvd	[1,00; 3,33]
Renovação do ar na estação de aquecimento	rphi	[0,50; 3,33]
Opacidade da pala de sombreamento sul na estação de aquecimento	sis	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento sul na estação de arrefecimento	svs	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento norte na estação de aquecimento	sin	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento norte na estação de arrefecimento	svn	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento este na estação de aquecimento	sie	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento este na estação de arrefecimento	sve	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento oeste na estação de aquecimento	sio	[0,00; 1,00]
Opacidade da pala de sombreamento oeste na estação de arrefecimento	svo	[0,00; 1,00]

### **Ficheiro *Command***

O ficheiro denominado de *Command* irá instruir o programa sobre quais as variáveis que serão alteradas, o intervalo em que estas variam, o valor inicial presente no ficheiro IDF e o valor do incremento que o programa pode realizar (Wetter, 2000).

### **Ficheiro *OptWin7***

O ficheiro de texto *OptWin7* indica ao programa qual o sistema operativo utilizado, quais os ficheiros IDF's que deverá utilizar e a sua localização. Com este ficheiro, o *GenOpt* fará a ligação ao *EnergyPlus*. Neste ficheiro define-se a “função de custo”, que é a função a otimizar, e a localização no IDF do *EnergyPlus* dos valores a otimizar existentes na função (Wetter, 2000).

### ***“Função de custo”***

Note-se que para este caso de estudo, e por forma a obterem-se valores otimizados de forma idêntica, a “função de custo” a minimizar pela ferramenta (Equação 2) será:

$$\min_{x \in X} f(x) = \min_{x \in X} (Q_{heat} + Q_{cool}) \quad [9]$$

Em que:

- $N_t$ , representa as necessidades energéticas totais;
- $Q_{heat}$ , representa as necessidades de aquecimento;
- $Q_{cool}$ , representa as necessidades de arrefecimento.

Desta forma ao correr a otimização garante-se que as necessidades energéticas totais são minimizadas de forma equilibrada, tentando-se garantir que tanto as necessidades de aquecimento como as de arrefecimento são minimizadas de forma equilibrada.

### **Ficheiros IDF's**

A utilização de dois ficheiros IDF's, deve-se à necessidade de ter um para reconhecer os valores iniciais e simular as situações e o outro para indicar as variáveis a alterar. O primeiro ficheiro IDF referido é obtido diretamente do *EnergyPlus*. O segundo é uma cópia feita do primeiro. Este é alterado, nos locais onde se encontram as variáveis a iterar, para tal, basta escrever no ficheiro de texto do IDF o nome de cada variável descrito no ficheiro *Command*, o ficheiro IDF tem o mesmo nome que o ficheiro original, sendo que é acrescentado ao final a seguinte nomenclatura: *\_Template* (Wetter, 2000). Mas antes de se poder utilizar os ficheiros IDF's no *GenOpt*, existe ainda uma alteração a que devem ser submetidos. O IDF original é simulado com dois períodos de simulação, um para a estação de aquecimento e outro para a estação de arrefecimento. A utilização do *GenOpt* torna-se mais simples se o período de simulação (*RunPeriod*) das suas simulações for anual, ou seja, existir apenas um que caracterize o ano todo. Assim, alterou-se os períodos de simulação dos ficheiros IDF's de acordo com as necessidades de simulação do *GenOpt* (Wetter, 2000).

Refere-se que devido às alterações realizadas nos períodos de simulação optou-se por voltar a correr a simulação dos resultados combinados da primeira fase de simulação.

### **4.3.3 Necessidades energéticas – Resultados do estudo de otimização**

Para cada zona climática estudada, foram obtidos diferentes resultados, sendo interessante constatar que o tempo associado à obtenção dos critérios de convergência foram significativamente superiores nas cidades de clima mais frio, sendo que o tempo decorrido para as simulações variou entre as três e treze horas. Outra constatação importante de referir é que para as poucas variáveis utilizadas, pois trata-se de um caso de estudo inicial, o número de iterações era sempre superior às 700, nunca tendo sido ultrapassadas as 1600 iterações.

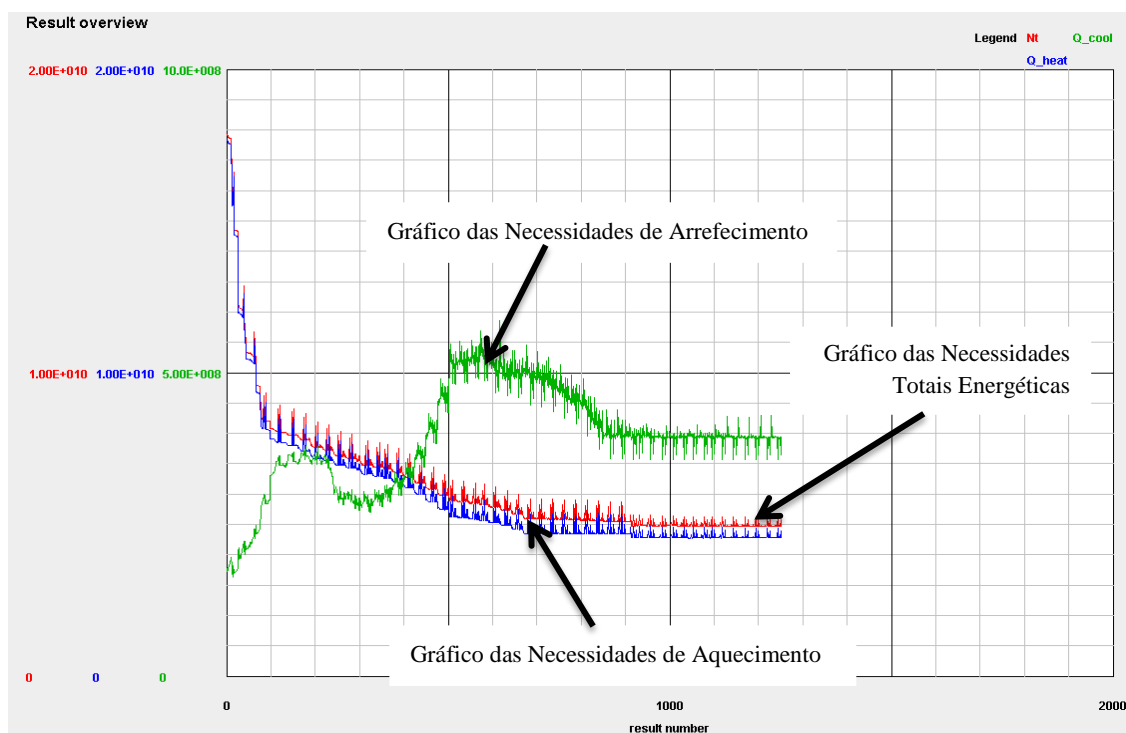
Os resultados obtidos através do *GenOpt* são apresentados quer graficamente, aproveitando as potencialidades da ferramenta, quer numericamente após terem sido sintetizados. Assim como se poderá observar a partir das secções subsequentes onde serão apresentados graficamente os resultados, a janela do *GenOpt* é dividida em duas secções, uma que mostra os resultados que estão a ser obtidos em tempo real para a “função de custo” por cada iteração, e por um gráfico em que é desenhado o percurso realizado por cada elemento da “função de custo” e pelas variáveis ao longo do processo iterativo. Apesar da ferramenta oferecer a hipótese de escolha de todas as variáveis em análise e dos elementos da função de custo, para simplicidade, a análise gráfica irá apenas mostrar percurso dos elementos da “função de custo”. Em relação aos quadros, no primeiro indica-se o número da simulação e o número da iteração dessa simulação, o valor das necessidades totais, das necessidades de aquecimento e de arrefecimento e no segundo quadro quais os valores que as variáveis em estudo



tomaram. Por simplicidade, neste subcapítulo apresenta-se apenas os valores das necessidades energéticas da moradia de referência e os valores resultantes da minimização da “função de custo”, sendo os restantes resultados apresentados em anexo.

### **Bragança**

A primeira análise de otimização realizada para a cidade de Bragança implicou um total de 1581 iterações. Apresentam-se na Figura 4.6 os resultados obtidos em termos de evolução das necessidades energéticas ao longo do processo iterativo. Nesta pode ver-se o gráfico obtido com o programa. É de referir que este apenas indica a evolução dos parâmetros que constituem a “função de custo”.



**Figura 4.6** – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Bragança.

Como se pode observar a partir do gráfico da Figura 4.6 as otimizações realizadas com recurso ao *GenOpt* são bem sucedidas, na medida em que resultam numa diminuição das necessidades de aquecimento e das necessidades energéticas totais. É de referir que ao contrário das duas necessidades energéticas referidas anteriormente, as necessidades de arrefecimento sofrem um aumento, tal consequência seria espectável, pois as variáveis estudadas condicionam mais as necessidades de aquecimento que as de arrefecimento, existindo sempre a tendência de melhorar as necessidades de aquecimento em detrimento das de arrefecimento. Nos Quadros 4.42 e 4.43 estão indicados os valores iniciais e os valores finais resultantes da análise de otimização.

**Quadro 4.42** – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”.

Simulação número	Iteração principal	Nt [J]	Q_heat [J]	Q_cool [J]
1	1	1,38E+10	1,37E+10	1,20E+08
1522	66	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08

**Quadro 4.43** – Resultados para cada variável estudada.

Simulação N°	azimuth	Dimensões									
		a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec
1	0	1,40	1,40	1,40	1,40	0,60	0	0	0	0,04	0,08
1522	-17,5	8,50	1,40	1,40	6,60	1,25	1,25	1,25	1,25	0,08	0,15
Simulação N°	Renovações horárias			Opacidade							
	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo
1	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1522	1,28	0,6	0,3	1	0	1	0	1	0	1	0

Com os novos valores obtidos para cada variável foram calculadas novamente as necessidades energéticas, tendo como resultados os valores indicados no Quadro 4.44.

**Quadro 4.44** – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Bragança e respetiva variação nominal e percentual.

Necessidades	Iniciais	2ª Fase (Final)	Variação	%
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	179,36	53,70	-125,66	-70,06
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	1,34	1,09	-0,25	-18,66
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,27	56,27	0,00	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	74,34	61,75	-12,59	-16,94

Como se pode verificar, para a cidade de Bragança, o estudo foi bem sucedido, dado a otimização mostrar um potencial de diminuição significativo das necessidades energéticas.

### Évora

O estudo de otimização realizado para a cidade de Évora implicou um total de 1337 iterações. Os resultados gráficos obtidos são apresentados na Figura 4.7. De acordo com o gráfico os resultados obtidos em termos de evolução das necessidades energéticas ao longo do processo iterativo são bem sucedidos, dado que as necessidades totais energéticas diminuíram, tal como as necessidades de aquecimento, ao contrário das de arrefecimento que aumentaram.

Os Quadros 4.45 e 4.46 apresentam os resultados principais da análise otimizada realizada para a cidade de Évora.

**Quadro 4.45** – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”.

Simulação número	Iteração principal	Nt [J]	Q_heat [J]	Q_cool [J]
1	1	9,76E+09	9,33E+09	4,30E+08
1287	60	1,95E+09	1,15E+09	7,99E+08

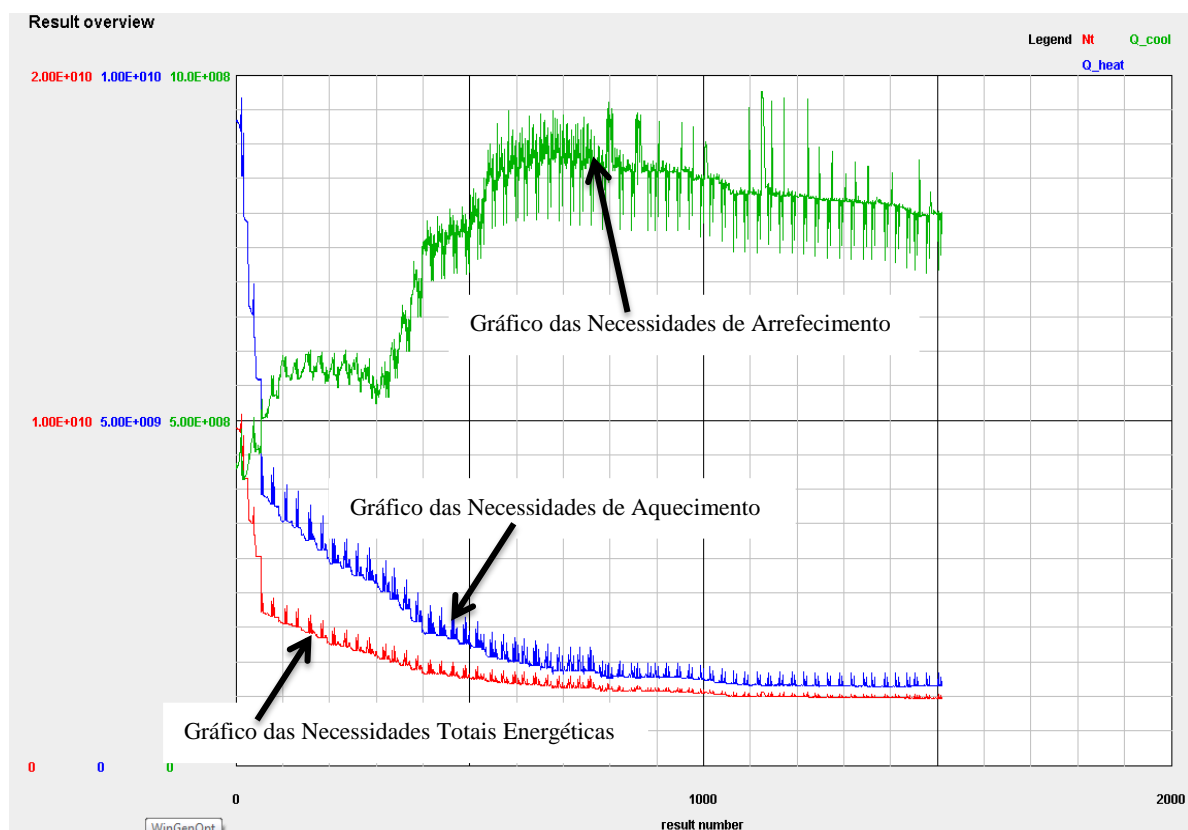


Figura 4.7 – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Évora.

Quadro 4.46 – Resultados para cada variável estudada.

Simulação Nº	azimuth	Dimensões									
		a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec
1	0	1,40	1,40	1,40	1,40	0,60	0	0	0	0,03	0,06
1287	-14,38	8,50	1,40	1,40	6,45	1,25	1,25	1,25	1,25	0,08	0,15
Simulação Nº	Renovações horárias			Opacidade							
	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo
1	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1287	2	0,6	0,3	1	0	1	0	1	0	1	0

Com os novos valores obtidos para cada variável foram calculadas novamente as necessidades energéticas, tendo como resultado os valores indicados no Quadro 4.47.

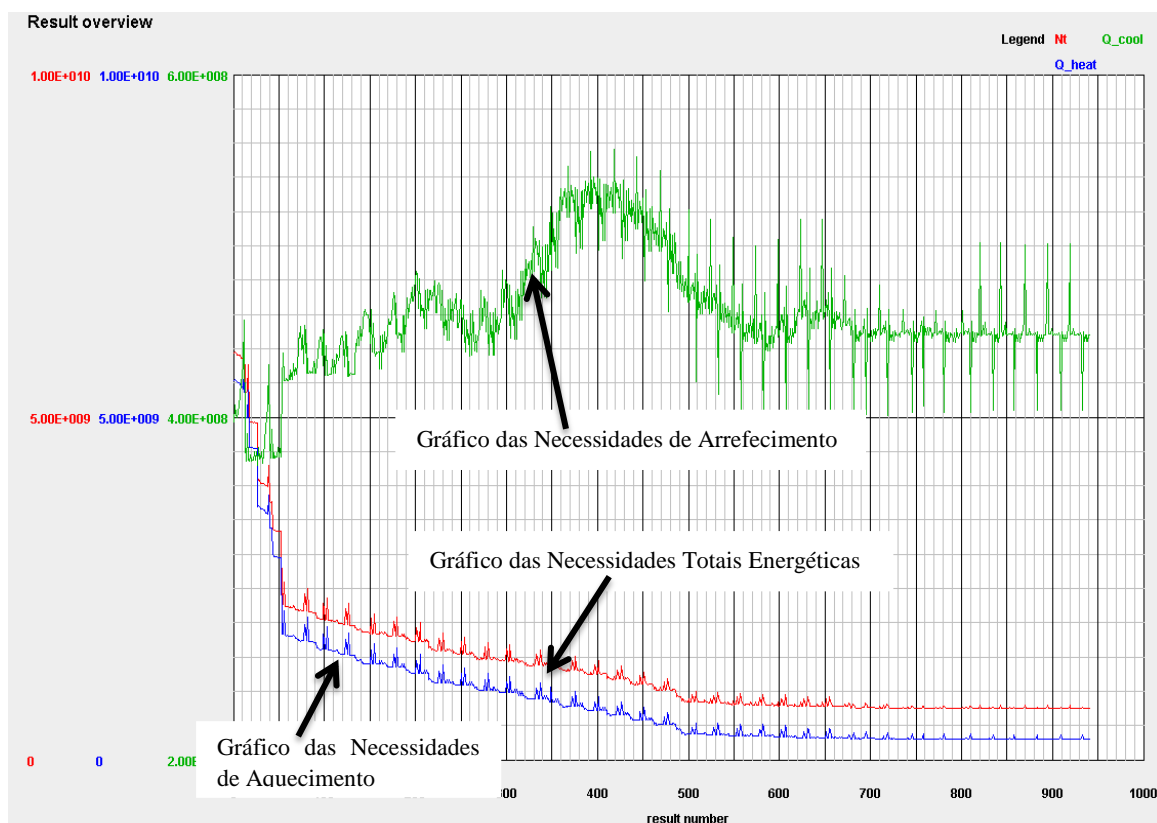
Quadro 4.47– Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Évora e respetiva variação nominal e percentual.

Necessidades	Iniciais	2ª Fase (Final)	Variação	%
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	109,28	14,64	-94,64	-86,60
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	3,55	2,13	-1,42	-40,00
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,24	54,24	0,00	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	65,53	55,92	-9,61	-14,67

A diminuição das necessidades é bastante visível, principalmente no que toca à estação de aquecimento, conclui-se assim que a aplicação dos algoritmos (*GenOpt*) no estudo de otimização é um sucesso.

## Faro

Para a cidade de Faro registou-se o menor número de iterações, neste caso 806. A evolução do processo iterativo está apresentada na Figura 4.8, esta apresenta graficamente o percurso das necessidades de aquecimento, necessidades energéticas totais e necessidades de arrefecimento. Como se pode verificar as duas primeiras diminuíram enquanto que a última sofreu um aumento.



**Figura 4.8** – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Faro.

Os valores iniciais e finais das obtidos para as variáveis estudadas estão resumidos nos Quadros 4.48 e 4.49.

**Quadro 4.48** – Resultados para cada variável estudada.

Simulação N°	azimuth	Dimensões									
		a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec
1	0	1,40	1,40	1,40	1,40	0,60	0	0	0	0,03	0,06
775	-2,5	8,50	1,40	1,40	1,40	1,25	1,25	1,25	1,25	0,08	0,15
Simulação N°	Renovações horárias			Opacidade							
	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo
1	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
775	2	0,6	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0

**Quadro 4.49** – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”.

Simulação número	Iteração principal	Nt [J]	Q_heat [J]	Q_cool [J]
1	1	5,93E+09	5,53E+09	3,97E+08
775	38	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08

Ao simular a moradia de referência com os novos valores das variáveis obtiveram-se as necessidades energéticas otimizadas, estas estão apresentadas no Quadro 4.50.

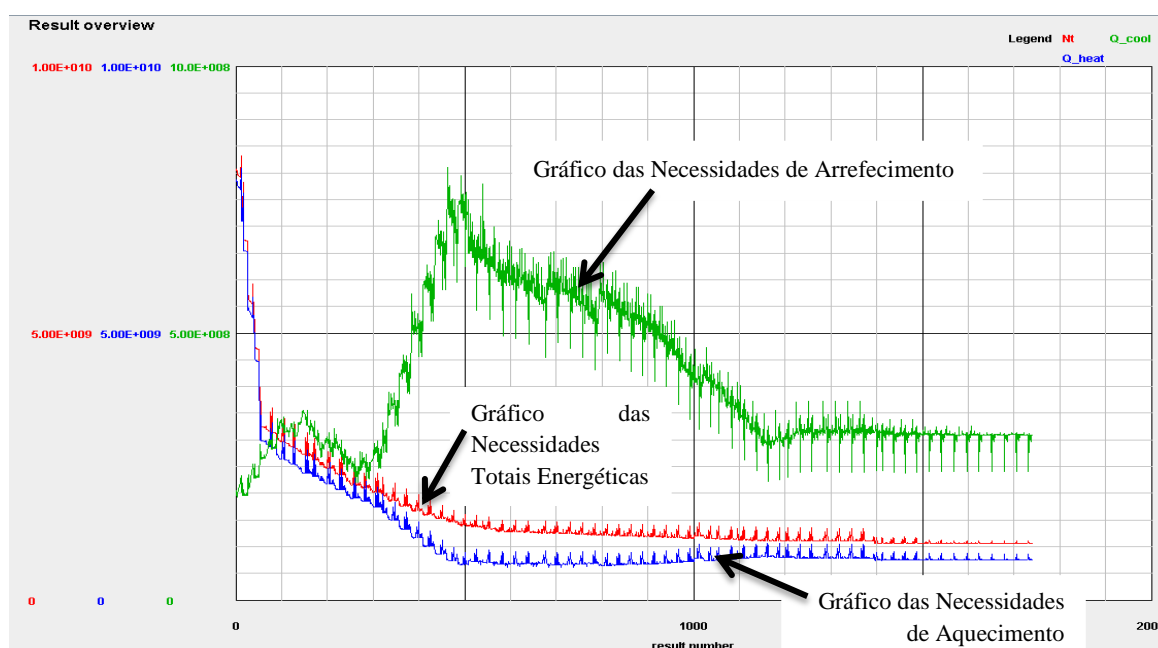
**Quadro 4.50** – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Faro e respetiva variação nominal e percentual.

Necessidades	Iniciais	2ª Fase (Final)	Variação	%
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	49,96	4,07	-45,89	-91,84
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	4,84	2,04	-2,80	-57,85
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	54,29	54,29	0,00	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	59,77	54,90	-4,87	-8,15

Como se pode ver pelo quadro anterior, o estudo revelou ser bem sucedido, dado que as diminuições obtidas entre os valores iniciais das necessidades e os otimizados são relevante.

## Lisboa

A simulação realizada para a cidade de Lisboa necessitou de 1548 iterações para convergir. A Figura 4.9 mostra a evolução das necessidades energéticas até à convergência. Pelo gráfico da Figura 4.9 observa-se que as necessidades de aquecimento e as necessidades energéticas totais diminuem, enquanto que as necessidades de arrefecimento aumentam.



**Figura 4.9** – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Lisboa.

Nos Quadros 4.51 e 4.52 são apresentados os valores iniciais e finais dos elementos da “função de custo” e das variáveis estudadas.

**Quadro 4.51** – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”.

Simulação número	Iteração principal	Nt [J]	Q_heat [J]	Q_cool [J]
1	1	8,04E+09	7,84E+09	1,95E+08
1499	67	1,06E+09	7,48E+08	3,09E+08

**Quadro 4.52** – Resultados para cada variável estudada.

Simulação N°	azimuth	Dimensões									
		a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec
1	0	1,40	1,40	1,40	1,40	0,6	0	0	0	0,03	0,06
1499	-10	8,50	1,40	1,74	2,20	1,25	1,25	12,5	1,25	0,08	0,15
Simulação N°	Renovações horárias			Opacidade							
	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo
1	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1499	2	0,6	0,3	1	0	1	0	1	0	1	0

Ao simular novamente a moradia de referência, substituindo os valores iniciais das variáveis pelos obtidos através do estudo de otimização obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 4.53.

**Quadro 4.53** – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade de Lisboa e respetiva variação nominal e percentual.

Necessidades	Iniciais	2ª Fase (Final)	Variação	%
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	84,74	8,51	-76,23	-89,96
$N_{vc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	2,96	1,28	-1,68	-56,76
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	55,24	55,24	0,00	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	64,01	56,22	-7,79	-12,17

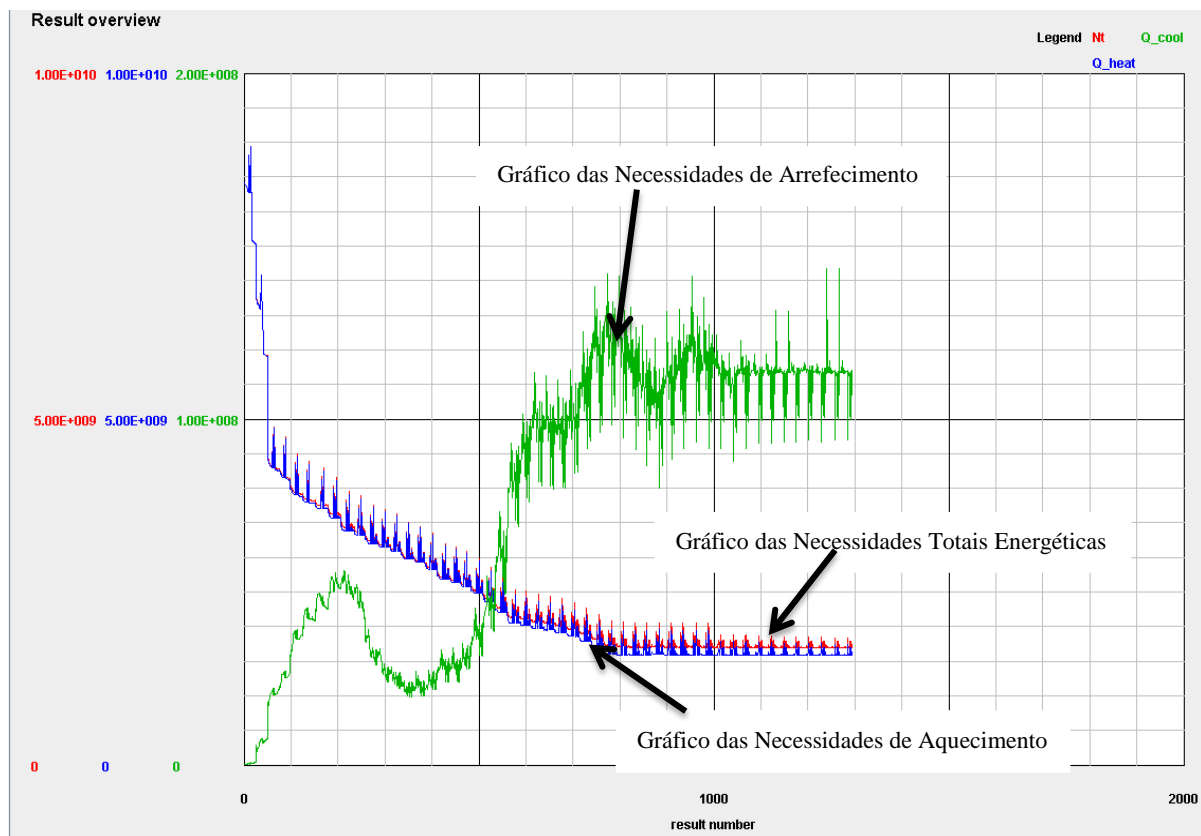
Uma vez mais se prova o sucesso da utilização dos algoritmos presentes no *GenOpt* para o estudo de soluções de otimização, dado que obtiveram-se diminuições significativas das necessidades energéticas.

### **Porto**

No caso da cidade do Porto a ferramenta realizou 1165 iterações até obter os valores ótimos para a “função de custo”. Na Figura 4.10 pode observar-se o percurso que os parâmetros da função realizaram até se obter a convergência. Os valores otimizados obtidos promovem diminuições das necessidades de aquecimento e das necessidades energéticas totais e aumento das necessidades de arrefecimento.

**Quadro 4.54** – Número de simulação, iteração e resultados da “função de custo”.

Simulação número	Iteração principal	Nt [J]	Q_heat [J]	Q_cool [J]
1	1	8,41E+09	8,41E+09	14077,3
1085	45	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08



**Figura 4.10** – Gráfico da variação dos elementos da “função de custo” para a moradia situada na cidade de Porto.

Nos Quadros 4.54 e 4.55 são apresentados os valores iniciais de cada variável e os finais, após o estudo de otimização realizado.

**Quadro 4.55** – Resultados para cada variável estudada.

Simulação Nº	azimuth	Dimensões									
		a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec
1	0	1,40	1,40	1,40	1,40	0,60	0	0	0	0,06	0,8
1085	1,25	8,50	1,40	6,04	6,15	1,25	1,25	1,25	1,25	0,08	0,15
Simulação Nº	Renovações horárias			Opacidade							
	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo
1	0,6	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
1085	1,61	0,6	0,3	1	0	1	0	1	0	1	0

Os resultados obtidos para cada variável estudada levaram a novos valores das necessidades energéticas, estes são apresentados no Quadro 4.56.

O estudo foi bem sucedido, uma vez que se conseguiu obter diminuições significativas das necessidades energéticas, exceptuando no caso das necessidades de arrefecimento, estas sofreram um aumento, que pode ser desconsiderado, dado o peso destas na função de custo.

**Quadro 4.56** – Valores das necessidades iniciais e após a segunda fase de otimização da moradia de referência localizada na cidade do Porto e respetiva variação nominal e percentual.

Necessidades	Iniciais	2ª Fase (Final)	Variação	%
$N_{ic}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	110,94	20,72	-90,22	-81,32
$N_{ve}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	0,071	0,20	+0,129	+181,69
$N_{ac}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	56,96	56,96	0,00	0,00
$N_{tc}$ (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	68,06	59,02	-9,04	-13,28

#### 4.4 3ª Fase - Análise dos resultados

Neste subcapítulo pretende-se analisar de forma crítica os resultados obtidos na sequência do estudo de otimização e as suas repercussões no gráfico de balanço energético nulo da moradia de referência para cada zona climática analisada. Esta análise servirá, entre outros, para a construção dos gráficos de balanço energético nulo, que permitirão compreender de uma forma ilustrativa a importância do presente estudo do ponto de vista do potencial da otimização levada a cabo em função do zonamento climático. A análise dos resultados será feita em duas fases:

**Fase A.** Análise geral dos resultados obtidos para cada variável;

**Fase B.** Análise das necessidades energéticas calculadas com base no pressuposto de uma utilização permanente dos equipamentos de climatização e AQS, construção e análise dos gráficos de balanço energético nulo.

##### 4.4.1 Fase A - Análise geral dos resultados obtidos para cada variável

Inicialmente, o valor do azimuth, para todas as zonas climáticas em estudo, foi fixado para um valor de 0°. Verifica-se que em resultado do processo de otimização, para todas as zonas climáticas, esta variável sofreu alterações, garantindo desta forma a captação ótima da radiação solar. Refere-se que o intervalo resultante do estudo para as zonas climáticas varia entre o valor de 1,25° e o valor de -17,5°.

Tal como referido anteriormente, a dimensão horizontal inicial de todos os envidraçados é de 1,40 m. O estudo desta dimensão permite aumentar ou diminuir a quantidade de radiação captada pelos vãos envidraçados, o que irá influenciar o valor dos ganhos internos, tendo em conta que são as necessidades de aquecimento que maiores otimizações necessitam os vãos envidraçados foram otimizados com essa ideia. O vão envidraçado a sul, para todas as zonas climáticas, aumentou a sua dimensão horizontal para 8,50 m, permitindo assim uma maior captação de radiação solar, o envidraçado a norte manteve sempre a dimensão original, os restantes vãos envidraçados variaram a sua dimensão original de acordo com o novo ângulo. Desta forma garantiu-se o aumento dos ganhos internos o que diminui as necessidades energéticas de aquecimento. Por sua vez estas alterações promovem o aumento das necessidades de arrefecimento, de maneira a combater esse aumento foi estudado o uso de palas de sombreamento.

Originalmente a moradia de referência tinha apenas uma pala de sombreamento horizontal com 0,60 m de comprimento a todo o comprimento do vão envidraçado a sul. Com o aumento do tamanho dos vãos envidraçados e a modificação do azimuth existiu a necessidade de estudar a necessidade de colocação de palas de sombreamento horizontais nas janelas e o respetivo comprimento. O estudo das palas de sombreamento horizontais foi feito colocando-as em todas as janelas com 1,25 m, por forma a



estudar a dimensão que permitisse o máximo sombreamento, fez-se variar o seu comprimento entre 0,10 m e 1,25 m, o que, após o estudo de otimização se verificou que o comprimento ótimo seria, para todas as janelas, de 1,25 m. Ao colocar palas de sombreamento horizontais em todos os vãos envidraçados conseguiu-se diminuir o valor das necessidades de arrefecimento, que tinha aumentado com a alteração da dimensão dos vãos envidraçados, mas por outro lado aumentou-se as necessidades de aquecimento, que são as que maior peso tem nas necessidades energéticas totais, desta forma passou a estudar-se a opacidade das palas

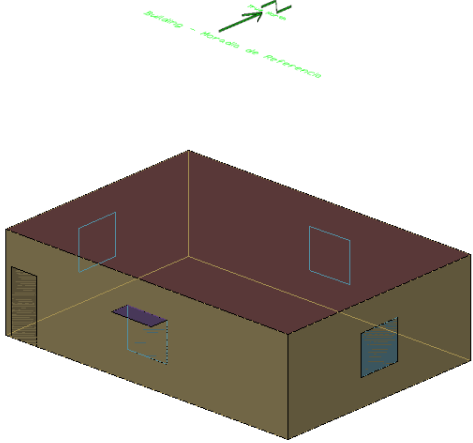
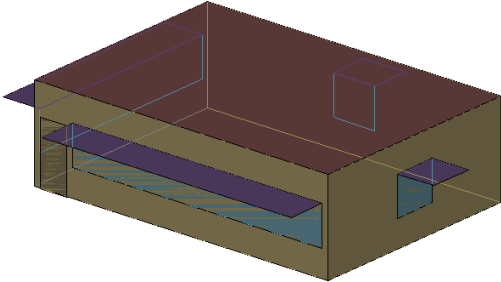
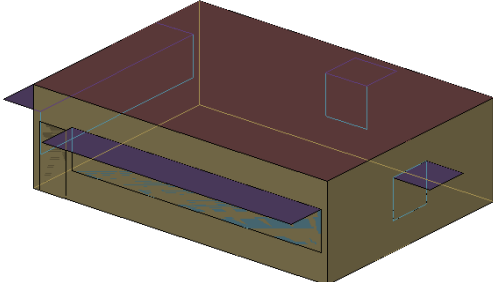
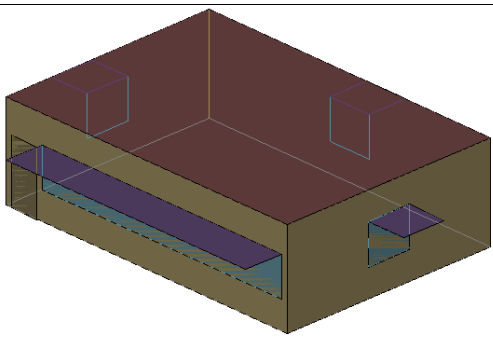
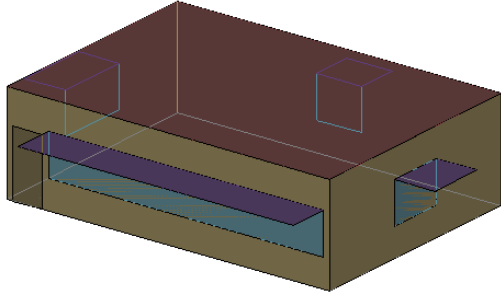
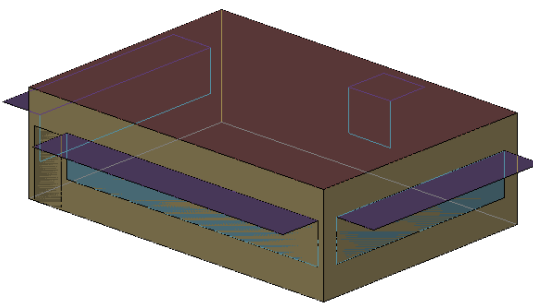
O estudo da opacidade das palas de sombreamento permite compreender qual a necessidade de existência de palas de sombreamento horizontais durante a estação de arrefecimento e/ou de aquecimento. Tal como seria de esperar a análise de otimização feita à opacidade leva a que na estação de aquecimento a existência das palas de sombreamento horizontais seja desnecessária, o que permite usufruir ao máximo o aumento dos ganhos internos diminuindo as necessidades de aquecimento, em relação à estação de arrefecimento a existência de palas de sombreamento horizontais é obrigatória o que promove sombreamento dos vãos envidraçados diminuindo os ganhos internos o que diminui as necessidades de arrefecimento.

O estudo de otimização indicou que os valores ótimos da espessura dos isolamentos térmicos considerados, para as paredes e para a cobertura, seria de 8cm e 15cm respectivamente, ao invés dos valores mínimos colocados. Com o aumento da espessura dos isolamentos térmicos garantiu-se a diminuição das perdas por transmissão térmica, o que levou à diminuição das necessidades de aquecimento.

Inicialmente a moradia de referência foi dimensionada com ventilação natural, sendo que o valor do número das renovações horárias, para o ano inteiro, era de  $0,6 \text{ h}^{-1}$ . Durante o processo de otimização estudou-se a forma como era realizada a ventilação natural, ao invés de ser o mesmo valor para o ano inteiro separou-se as estações de aquecimento da de arrefecimento, sendo que para a estação de aquecimento a otimização revelou que o melhor valor para a ventilação natural seria de  $0,3 \text{ h}^{-1}$ , permitindo uma diminuição das perdas de calor por ventilação que por sua vez garantia a diminuição das necessidades de aquecimento, no caso da estação de arrefecimento existiu a necessidade de dividir o período de ventilação entre dia e noite, pois o estudo permitiu concluir que na estação de arrefecimento uma renovações horárias de  $1,28 \text{ h}^{-1}$  (Bragança) ou de  $2 \text{ h}^{-1}$  (restantes zonas climáticas) durante o período noturno e uma de  $0,6 \text{ h}^{-1}$  durante o período diurno permitiam a diminuição das necessidades de arrefecimento, garantindo o aumento das perdas de calor por ventilação.

Os pontos anteriores analisam as alterações ocorridas após a simulação de otimização, algumas dessas alterações são a nível estrutural do edifício, que é o caso da existência de palas e a dimensão dos envidraçados, desta forma, é importante comparar a arquitetura inicial da moradia de referência com a respetiva arquitetura após a simulação de otimização. No Quadro 4.57 apresentam-se, para cada zona climática, os respetivos desenhos tridimensional.

**Quadro 4.57** – Quadro comparativo dos desenhos tridimensionais da moradia de referência, antes e após o estudo.

		Bragança
		Évora
		Faro
		Lisboa
		Porto

#### 4.4.2 Fase B - Análise das necessidades energéticas, construção e análise dos gráficos de balanço energético nulo

As necessidades energéticas totais, anteriormente apresentadas, foram calculadas de acordo com a expressão do RCCTE, apresentada pela Equação 8, nesta apenas são considerados dez por cento das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, dado que a utilização dos equipamentos não é considerada permanente. Pretende-se que o estudo se aproxime da realidade, como tal a utilização dos equipamentos deve ser considerada permanente segundo a especificação de horários, assim a expressão correta para o cálculo das necessidades energéticas totais é:

$$N_{tc} = \frac{N_{ic}}{\eta_i} \times F_{pui} + \frac{N_{vc}}{\eta_v} \times F_{puv} + N_{ac} \times F_{pua} \quad [10]$$

Em que:

- $N_{tc}$  – Necessidades energéticas totais em energia primária, valor que se pretende calcular;
- $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  – Respetivamente, necessidades de aquecimento e necessidades de arrefecimento em energia útil, valores obtidos através da simulação no EnergyPlus;
- $N_{ac}$  – Necessidades de produção de AQS em energia útil, valor estimado com base na metodologia exposta no RCCTE;
- $\eta_i$  e  $\eta_v$  – Respetivamente, eficiência nominal dos equipamentos para aquecimento e para arrefecimento, valores retirados do RCCTE;
- $F_{pui}$ ,  $F_{puv}$  e  $F_{pua}$  – Respetivamente, fatores de conversão de energia útil para energia primária para as necessidades de aquecimento, arrefecimento e AQS, valores retirados do documento escrito por Atanasiu (2011).

Através da aplicação da Equação 10 construiu-se para cada cidade os gráficos comparativos das necessidades energéticas. Após ter-se realizado o estudo e a análise dos resultados é importante realizar os gráficos de balanço energético nulo, será a partir da construção destes que a validade do estudo será comprovada. Com a construção dos gráficos de balanço energético nulo poderá analisar-se se as medidas tomadas na otimização conseguem produzir diminuições nas necessidades energéticas suficientes de forma a permitir uma aproximação da denominação *nZEB*. Os gráficos do balanço energético nulo serão desenhados duas vezes, o primeiro com os valores das necessidades energéticas totais em energia primária e o segundo com os valores em energia final. Para cada zona climática será ainda calculado o valor máximo regulamentar permitido pelo RCCTE (2006), em energia primária (Equação 11) e em energia final (Equação 12):

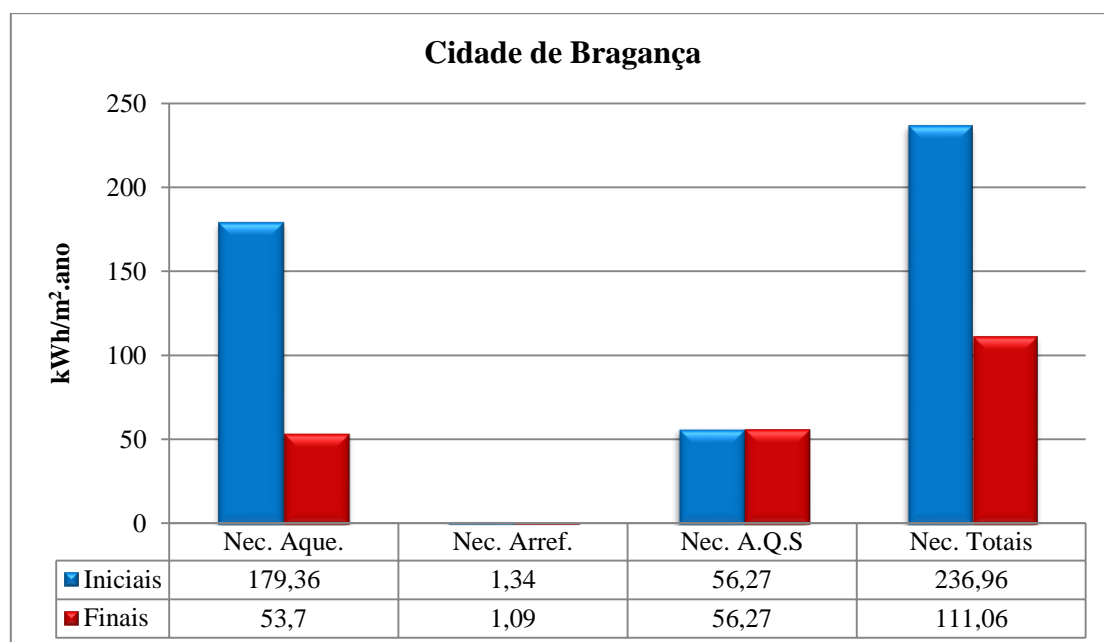
$$N_t = \frac{N_i}{\eta_i} \times F_{pui} + \frac{N_v}{\eta_v} \times F_{puv} + N_a \times F_{pua} \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{ano)} \quad [11]$$

$$N_t = \frac{N_i}{\eta_i} + \frac{N_v}{\eta_v} + N_a \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{ano)} \quad [12]$$

Desta forma, para cada zona climática obtém-se quadros com os valores das necessidades totais e o respetivo valor de energia solar mínimo regulamentar e a partir destes serão desenhados os respetivos gráficos.

#### Bragança

De acordo com a Equação 10 as necessidades energéticas para a cidade de Bragança serão as apresentados no gráfico da Figura 4.11.



**Figura 4.11** – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Bragança com as necessidades energéticas totais.

Como se pode observar pelo gráfico anterior as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energéticas totais sofreram diminuições após o processo de otimização. De seguida serão apresentados os dados necessários para a construção dos gráficos de balanço energético nulo. No Quadro 4.58 pode-se ver quais os valores obtidos para as necessidades energéticas totais, em energia primária e em energia final, para a cidade de Bragança e o respetivo valor de energia solar mínimo regulamentar.

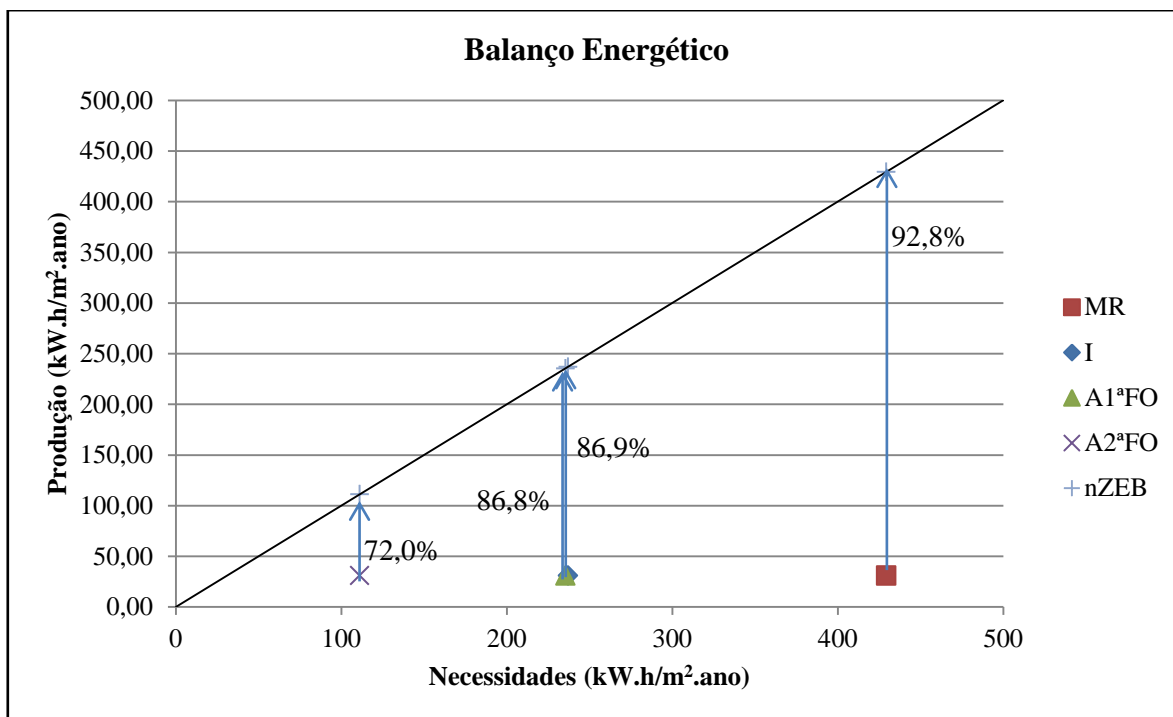
**Quadro 4.58** – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Bragança e da energia solar mínimo regulamentar.

Necessidades	Energia Primária	Energia Final	kW.h/m <sup>2</sup> .ano
<b>Máximo Regulamentar – MR</b>	429,42	206,75	
<b>Iniciais – I</b>	236,96	125,77	
<b>Após a 1ªFase – A1ªFO</b>	235,44	125,18	
<b>Após a 2ªFase (Final) – A2ªFO</b>	111,06	77,34	
Esolar <sup>6</sup>	31,06		

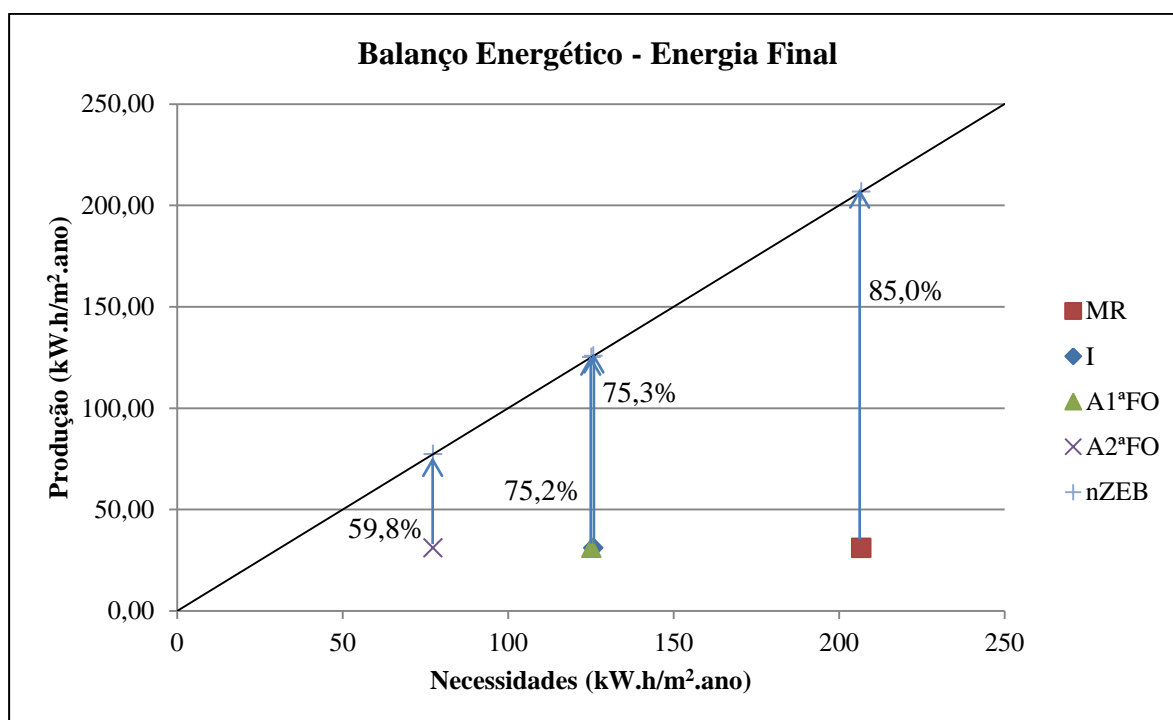
De acordo com os dados presentes no Quadro 4.58 relativos às necessidades energéticas em energia primária o estudo de otimização permitiu uma diminuição de 74,14% das necessidades energéticas, que em termos de valores absolutos representa menos 318,36 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas, em energia final as diminuições são de 62,59%, que equivale a menos 129,41 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas.

Com os valores presentes no Quadro 4.58 construíram-se os gráficos de balanço energético nulo em energia primária e em energia final, presentes nas Figuras 4.12 e 4.13.

<sup>6</sup> Valor por metro quadrado da área de pavimento da moradia de referência correspondente ao valor total retirado da nota técnica NT-SCE-01 (2009)



**Figura 4.12** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Bragança em energia primária.



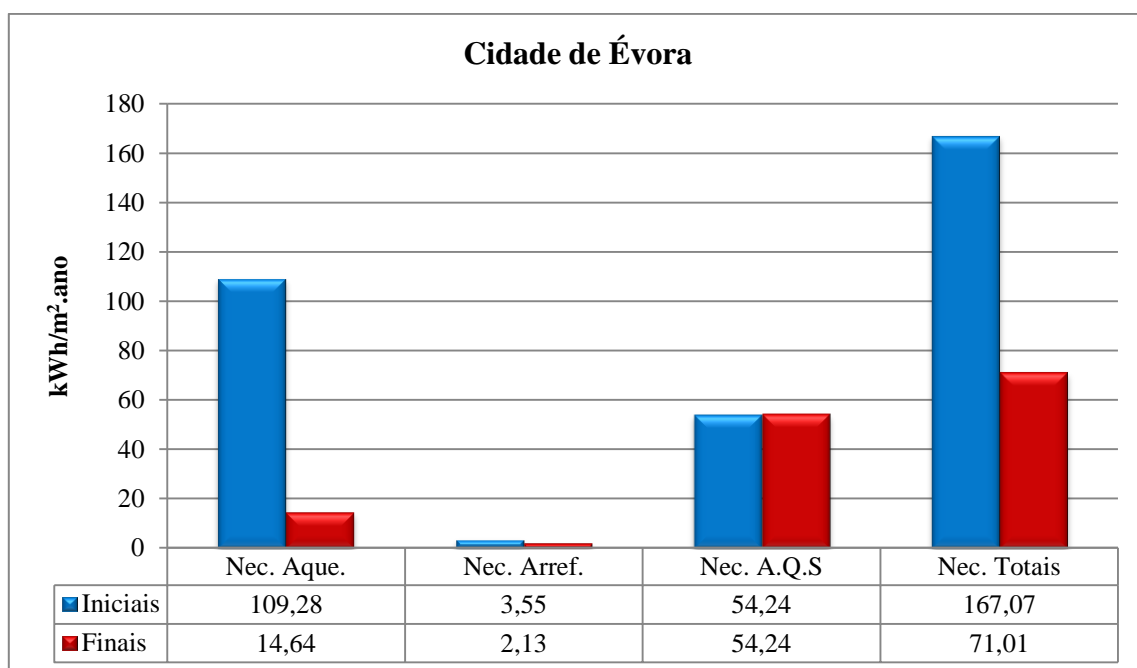
**Figura 4.13** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Bragança em energia final.

Observa-se que os pontos obtidos, em ambos os gráficos, estão sempre abaixo da linha de balanço energético nulo, desta forma optou-se por apresentar em todos os gráficos qual a percentagem de energia necessária a que se atinja o balanço energético nulo, permitindo uma mais fácil perceção da proximidade ao nível de referência considerado.

A análise dos dados apresentados no gráfico de balanço energético nulo em energia primária (Figura 4.12) permite constatar que consegue-se diminuir a necessidade de produção de energia de 92,8% para 72,0%, o que significa que se conseguiu diminuir as necessidades de produção de energia de 398,50 kWh/m<sup>2</sup>.ano para apenas 79,96 kWh/m<sup>2</sup>.ano. No caso dos dados apresentados no gráfico de balanço energético nulo em energia final (Figura 4.13) constata-se que a diminuição é de 85,0% para 59,8%, o que significa que se conseguiu diminuir as necessidades de produção de energia de 175,74 kWh/m<sup>2</sup>.ano para apenas 46,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

### Évora

A moradia de referência localizada em Évora tem elevadas necessidades de aquecimento e baixas necessidades de arrefecimento, tais constatações são retiradas do gráfico Figura 4.14.



**Figura 4.14** – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Évora.

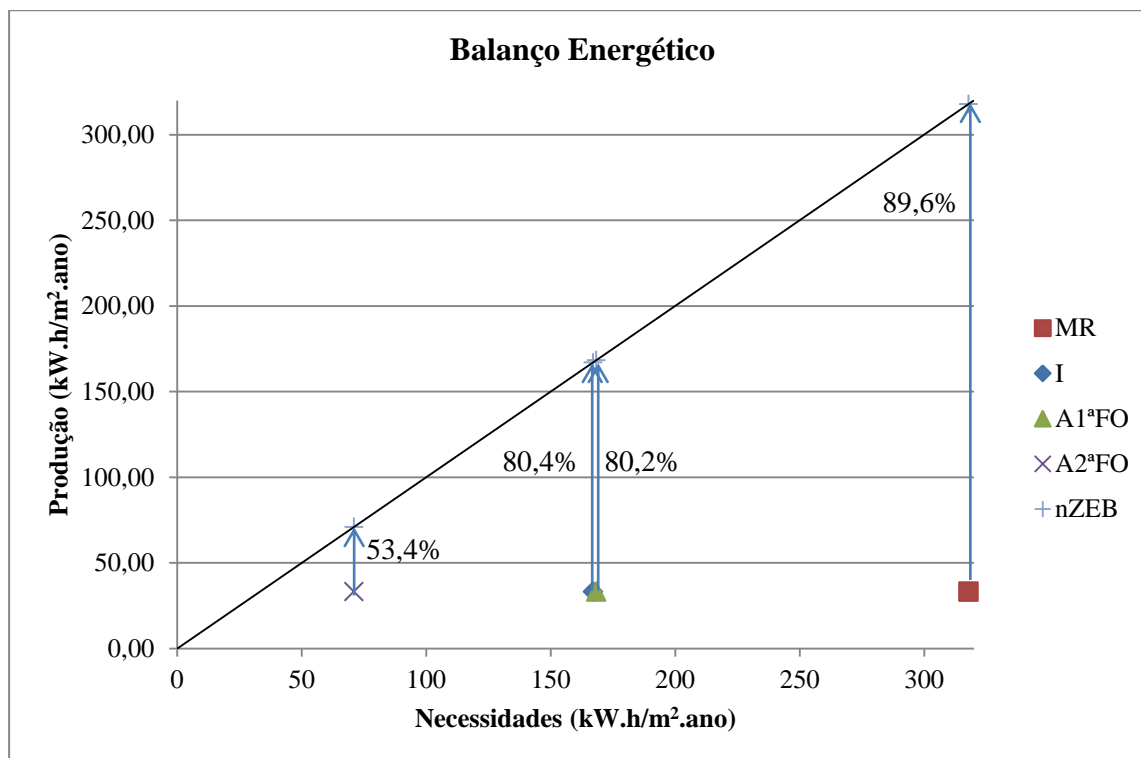
No Quadro 4.59 são apresentados os valores obtidos para as necessidades energéticas totais, em energia primária e em energia final.

**Quadro 4.59** – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Évora e da energia solar mínimo regulamentar.

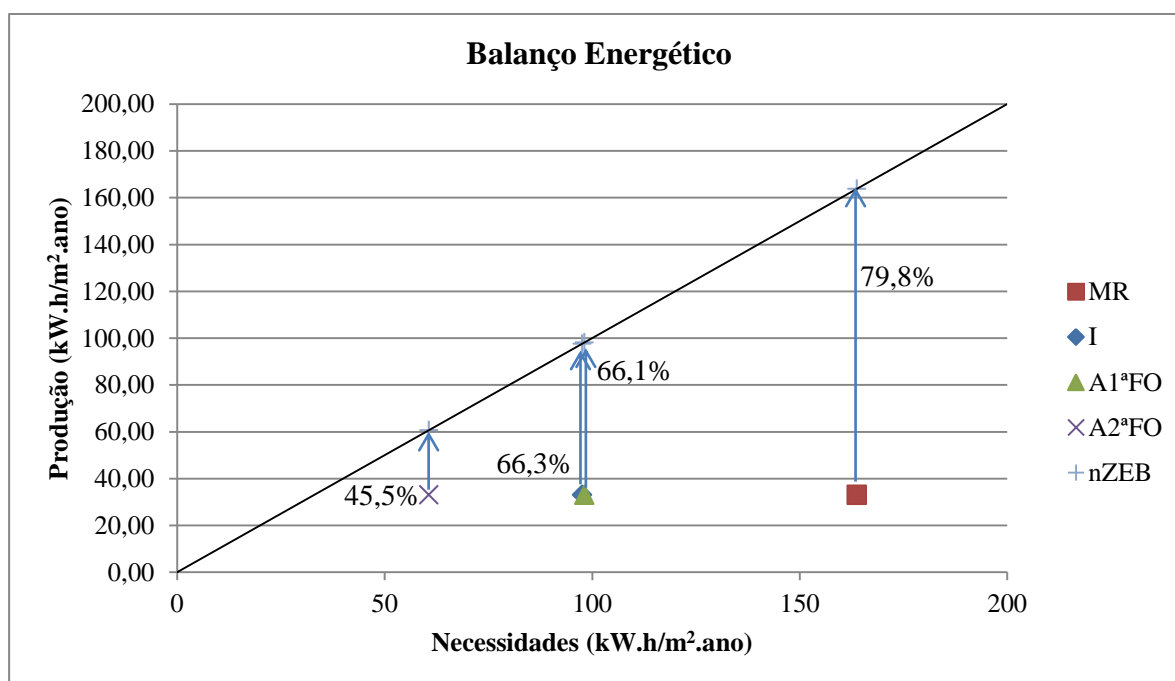
Necessidades	Energia Primária	Energia Final	kWh/m <sup>2</sup> .ano
<b>Máximo Regulamentar – MR</b>	317,77	163,81	
<b>Iniciais – I</b>	167,07	97,64	
<b>Após a 1ª Fase – A1ªFO</b>	168,38	98,14	
<b>Após a 2ª Fase (Final) – A2ªFO</b>	71,01	60,69	
Esolar	33,09		

Com os dados presentes no Quadro 4.59 constata-se que as necessidades energéticas em energia primária são reduzidas em 77,65%, que em termos de valores absolutos representa menos 246,76 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas, em energia final as diminuições são de 62,95%, que equivale a menos 103,12 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas.

Conhecendo os valores das necessidades energéticas totais foram desenhados os gráficos de balanço energético nulo em energia primária e energia final para a moradia de referência situada na cidade de Évora, presentes nas Figuras 4.15 e 4.16, respetivamente.



**Figura 4.15** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Évora em energia primária.



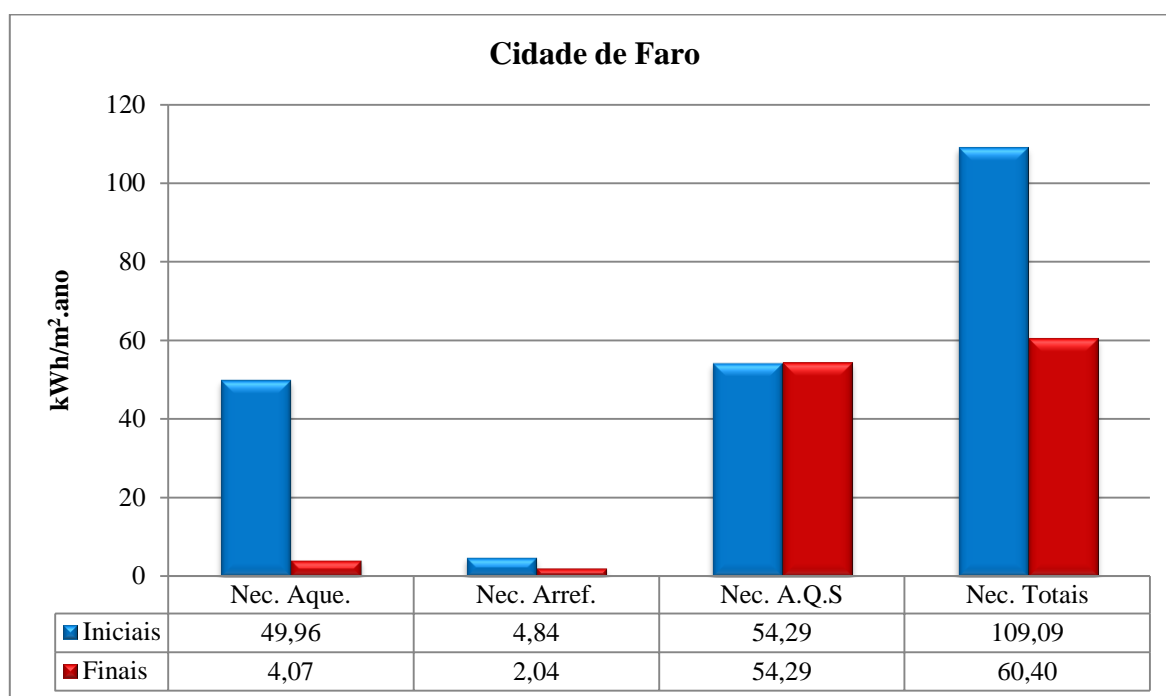
**Figura 4.16** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Évora em energia final.

Através da análise dos dados apresentados na Figura 4.15 constata-se que com o estudo de otimização permitiu diminuir a necessidade de produção de energia de 89,6% para 53,4%, o que, em valores

absolutos, significa que se conseguiu diminuir de 284,72 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 37,92 kWh/m<sup>2</sup>.ano as necessidades de produção de energia. No caso de se desenhar o gráfico de balanço energético nulo em energia final (Figura 4.16) as necessidades de produção de energia diminuíam de 79,8% para 45,5%, o que representa uma diminuição de 139,24 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 36,29 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

### **Faro**

As necessidades energéticas obtidas para a cidade de Faro podem ser analisadas através do gráfico da Figura 4.17.



**Figura 4.17** – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Faro.

As necessidades energéticas de aquecimento são menores em relação aos das restantes cidades estudadas e as de arrefecimento são superiores, com o estudo de otimização realizado conseguiu-se obter grandes diminuições destas.

De seguida são apresentados os dados necessários para a construção dos gráficos de balanço energético nulo. No Quadro 4.60 podem-se ver quais os valores obtidos para as necessidades totais, em energia primária e em energia final, para a cidade de Faro e o respetivo valor de energia solar mínimo regulamentar.

**Quadro 4.60** – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Faro e da energia solar mínimo regulamentar.

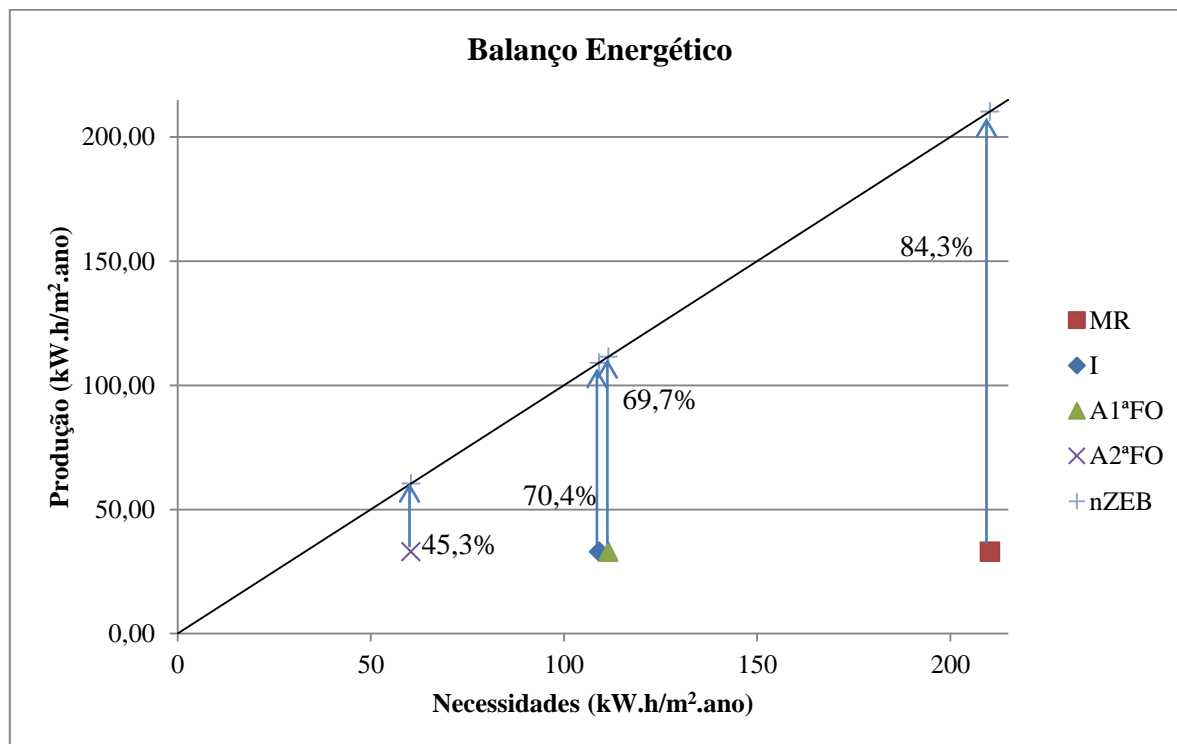
Necessidades	Energia Primária	Energia Final	kW.h/m <sup>2</sup> .ano
<b>Máximo Regulamentar – MR</b>	210,26	122,46	
<b>Iniciais – I</b>	109,09	75,37	
<b>Após a 1ª Fase – A1ªFO</b>	111,5	76,29	
<b>Após a 2ª Fase (Final) – A2ªFO</b>	60,4	56,64	
Esolar	33,04		

Com os dados presentes no Quadro 4.60 constata-se que as necessidades energéticas em energia primária são reduzidas em 71,27%, que em termos de valores absolutos representa menos 149,86

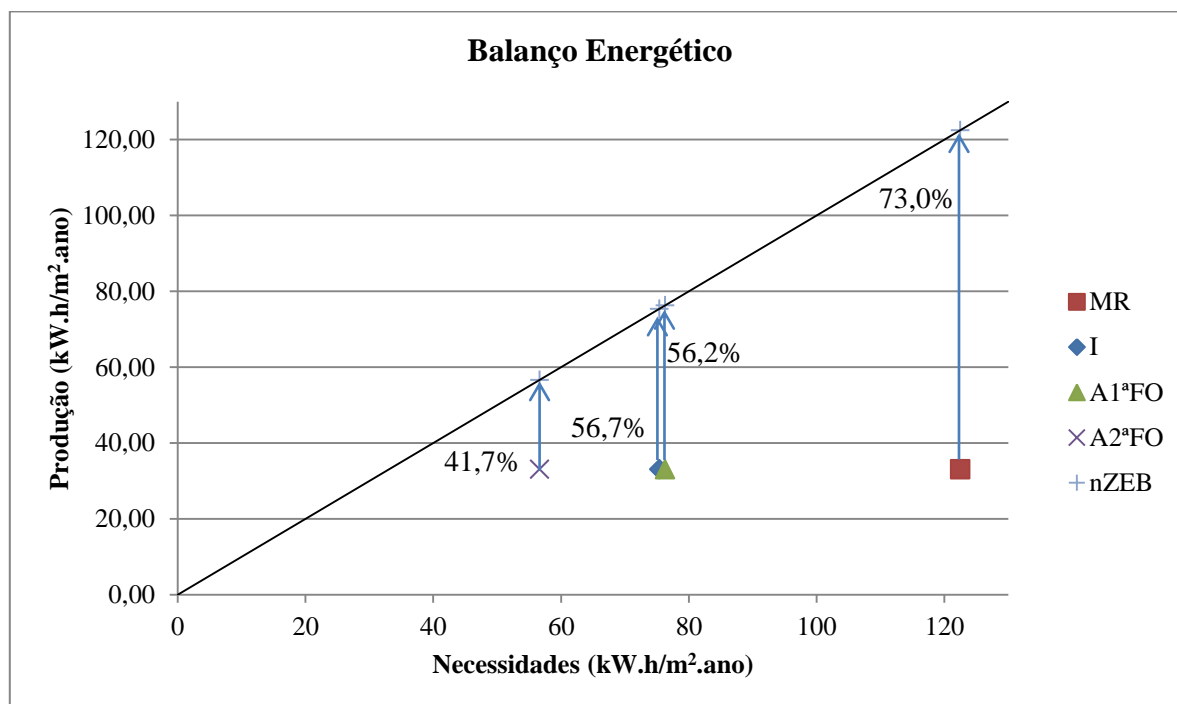


kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas, em energia final as diminuições são de 53,75%, que equivale a menos 65,82 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas.

Com os valores apresentados no Quadro 4.60 construíram-se os gráficos de balanço energético nulo em energia primária e em energia final, presentes nas Figuras 4.18 e 4.19.



**Figura 4.18** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Faro em energia primária.

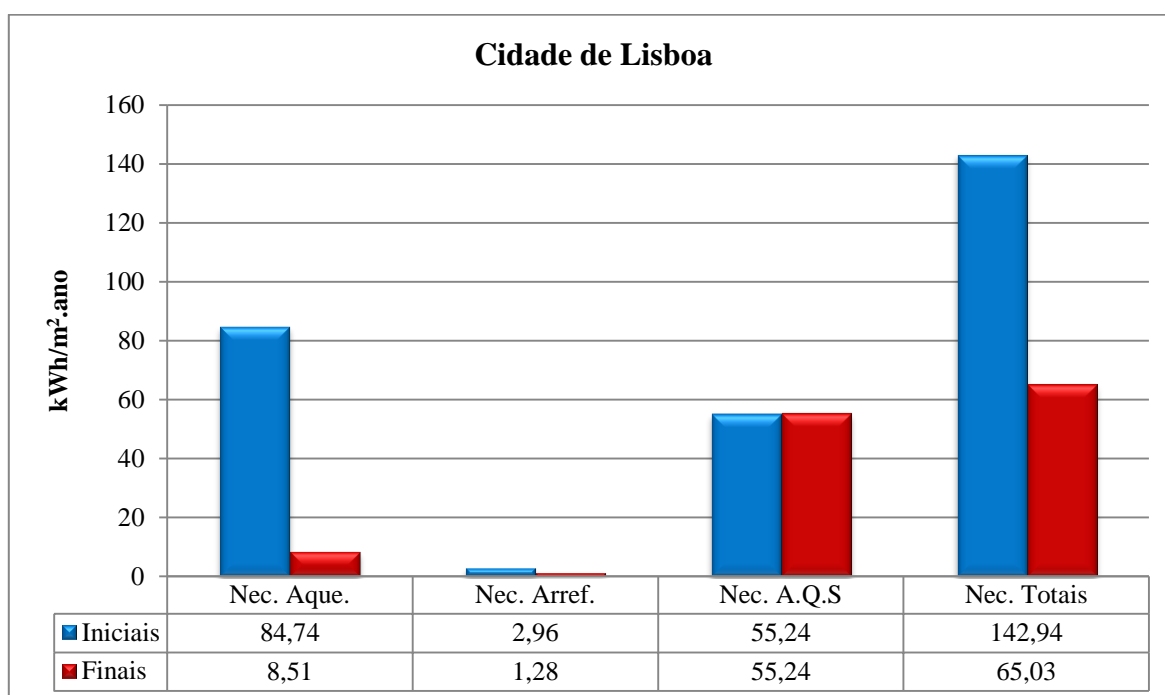


**Figura 4.19** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Faro em energia final.

Através da análise dos dados apresentados na Figura 4.18 constata-se que consegue-se diminuir as necessidades de produção energética de 84,3% para 45,3%, o que, em valores absolutos, significa que se conseguiu diminuir de 177,25 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 27,36 kWh/m<sup>2</sup>.ano as necessidades de produção de energia. No caso de se desenhar o gráfico de balanço energético nulo em energia final (Figura 4.19) as necessidades de produção de energia diminuem de 73,0% para 41,7%, o que representa uma diminuição de 89,40 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 23,62 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

### Lisboa

A Figura 4.20 mostra o gráfico comparativo das necessidades energéticas da moradia de referência implantada na cidade de Lisboa. Através deste pode ver-se que as necessidades de aquecimento são as que contribuem mais para as necessidades energéticas totais, constata-se também que são estas que tem uma maior diminuição.



**Figura 4.20** – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Lisboa.

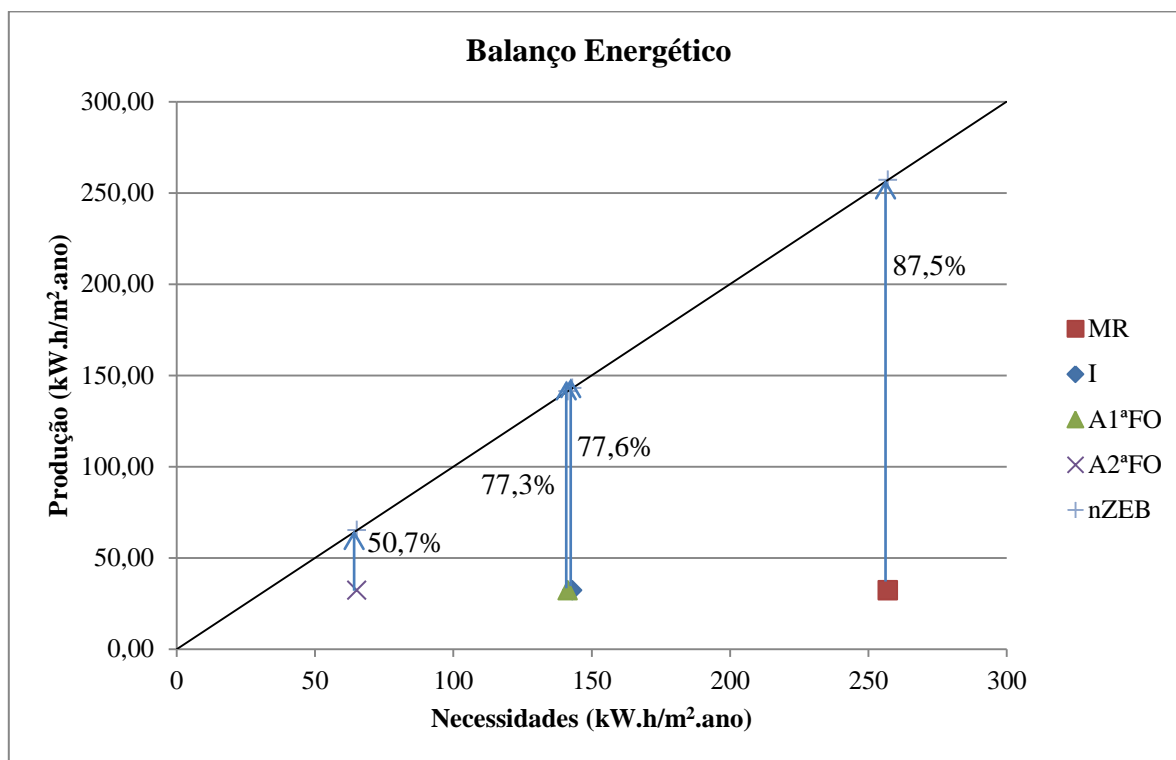
No Quadro 4.61 pode-se ver quais os valores obtidos para as necessidades energéticas totais, em energia primária e em energia final, para a cidade de Lisboa e o respetivo valor de energia solar mínimo regulamentar. Através destes realiza-se a construção dos gráficos de balanço energético nulo presentes nas Figuras 4.21 e 4.22.

**Quadro 4.61** – Quadro síntese das necessidades totais da cidade de Lisboa e da energia solar mínimo regulamentar.

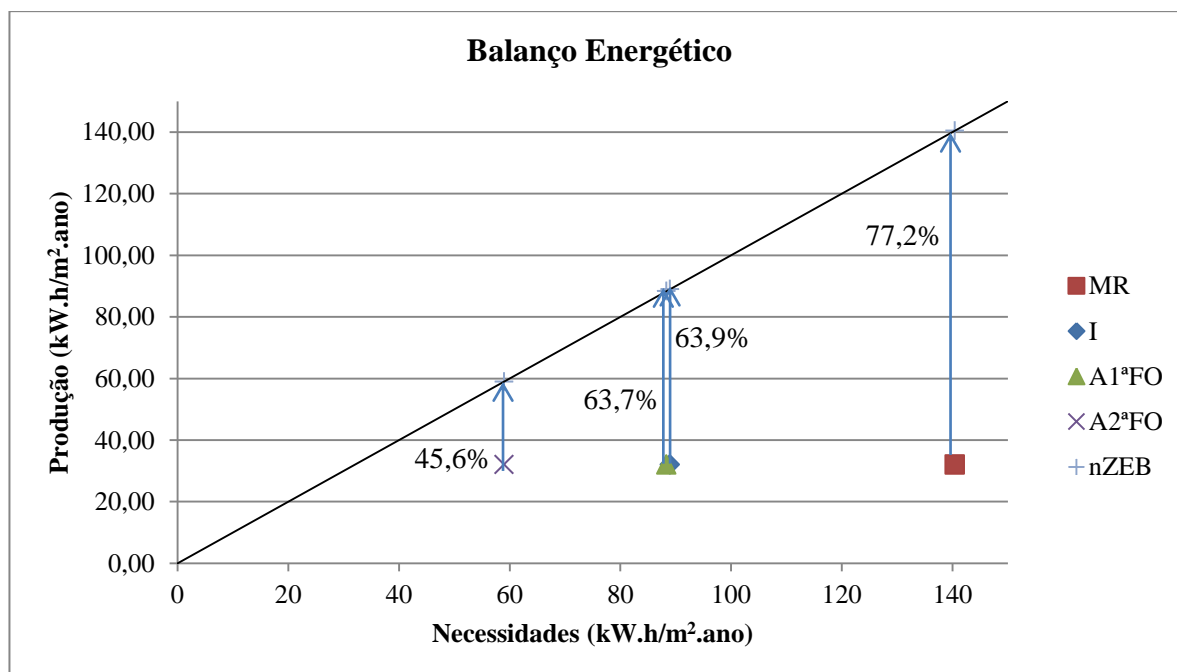
Necessidades	Energia Primária	Energia Final	kWh/m <sup>2</sup> .ano
Máximo Regulamentar – MR	256,96	140,42	
Iniciais – I	142,94	88,97	
Após a 1ª Fase – A1ªFO	141,31	88,34	
Após a 2ª Fase (Final) – A2ªFO	65,03	59,01	
Esolar	32,09		

Com os dados presentes no Quadro 4.61 constata-se que as necessidades energéticas em energia primária são reduzidas em 74,69%, que em termos de valores absolutos representa menos 191,93

kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas, em energia final as diminuições são de 57,97%, que equivale a menos 81,40 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas.



**Figura 4.21** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Lisboa em energia primária.



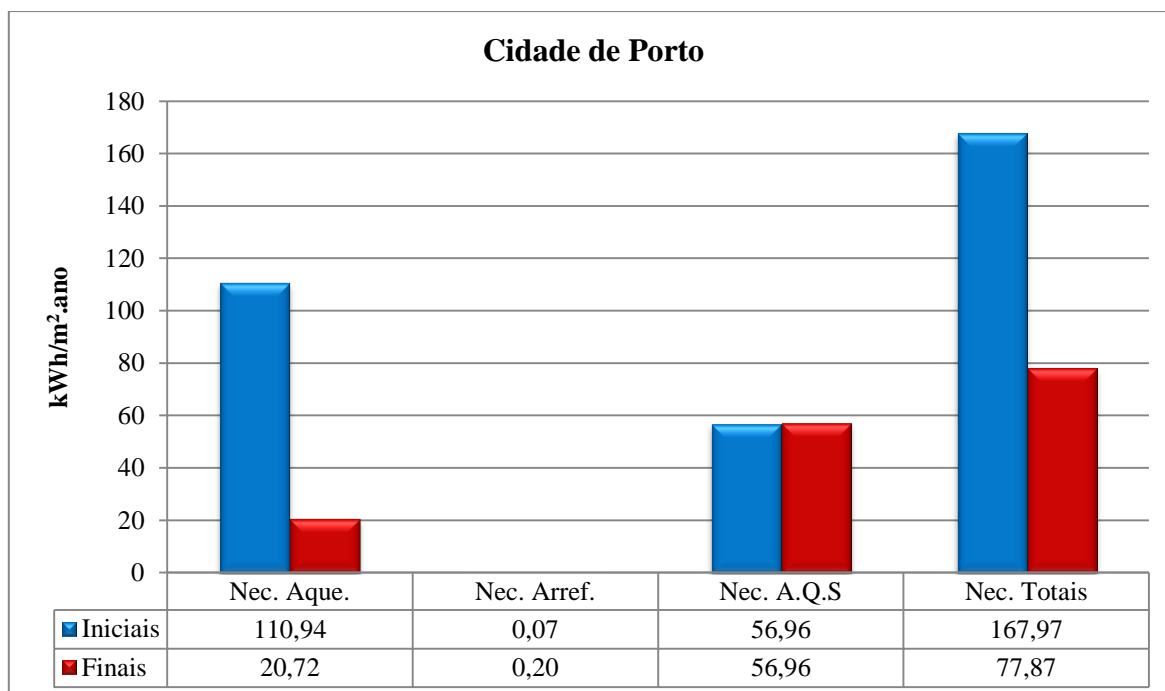
**Figura 4.22** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Lisboa em energia final.

Através da análise dos dados apresentados na Figura 4.21 constata-se que consegue-se diminuir as necessidades de produção energética de 87,5% para 50,7%, o que, em valores absolutos, significa que se conseguiu diminuir de 224,84 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 32,97 kWh/m<sup>2</sup>.ano as necessidades de produção de energia. No caso do gráfico de balanço energético nulo desenhado em energia final (Figura 4.22) as

necessidades de produção de energia diminuíam de 77,2% para 45,6%, o que representa uma diminuição de 108,40 kWh/m<sup>2</sup>.ano para 26,91 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

### Porto

O último estudo de otimização foi realizado para a cidade do Porto, conseguindo-se desta forma abranger todas as zonas climáticas de Portugal. Os resultados obtidos para esta cidade estão representados no gráfico da Figura 4.23. O gráfico permite a comparação dos valores iniciais e finais das necessidades, no caso da cidade do Porto as necessidades de arrefecimento sofreram um aumento no final do estudo de otimização, as necessidades de aquecimento diminuíram de forma drástica, o que promoveu à diminuição das necessidades energéticas totais.



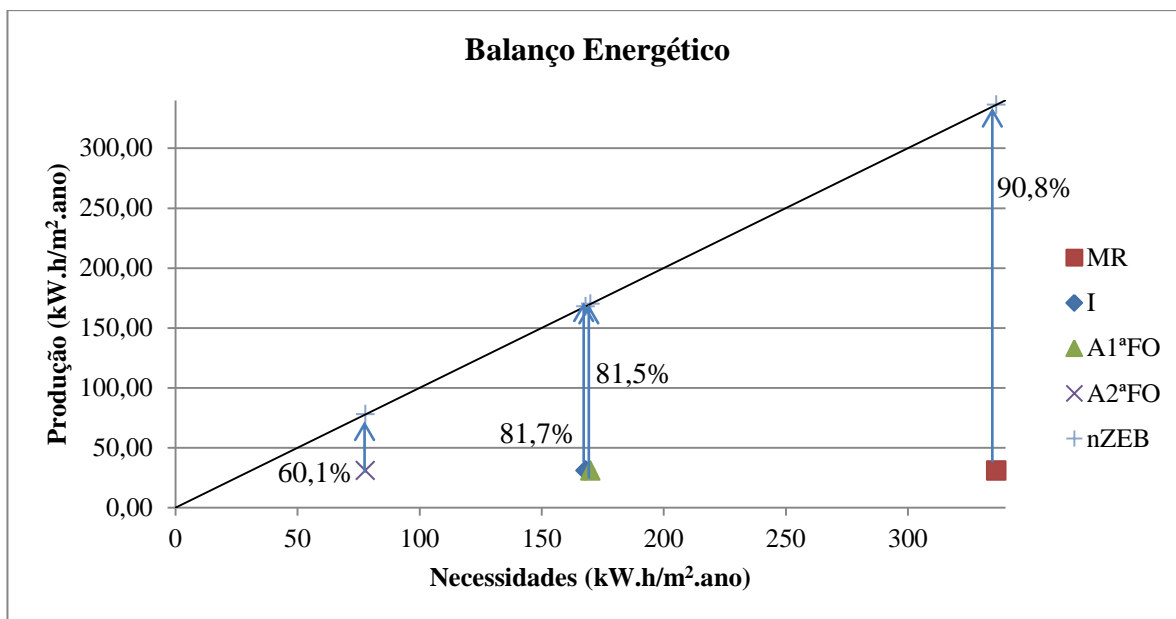
**Figura 4.23** – Gráfico das necessidades iniciais e finais para a cidade de Porto.

O Quadro 4.62 apresenta os valores obtidos para as necessidades energéticas totais, em energia primária e em energia final e o respetivo valor de energia solar mínimo regulamentar. Conhecendo os valores descritos anteriormente realizou-se a construção dos gráficos de balanço energético nulo presentes nas Figuras 4.24 e 4.25.

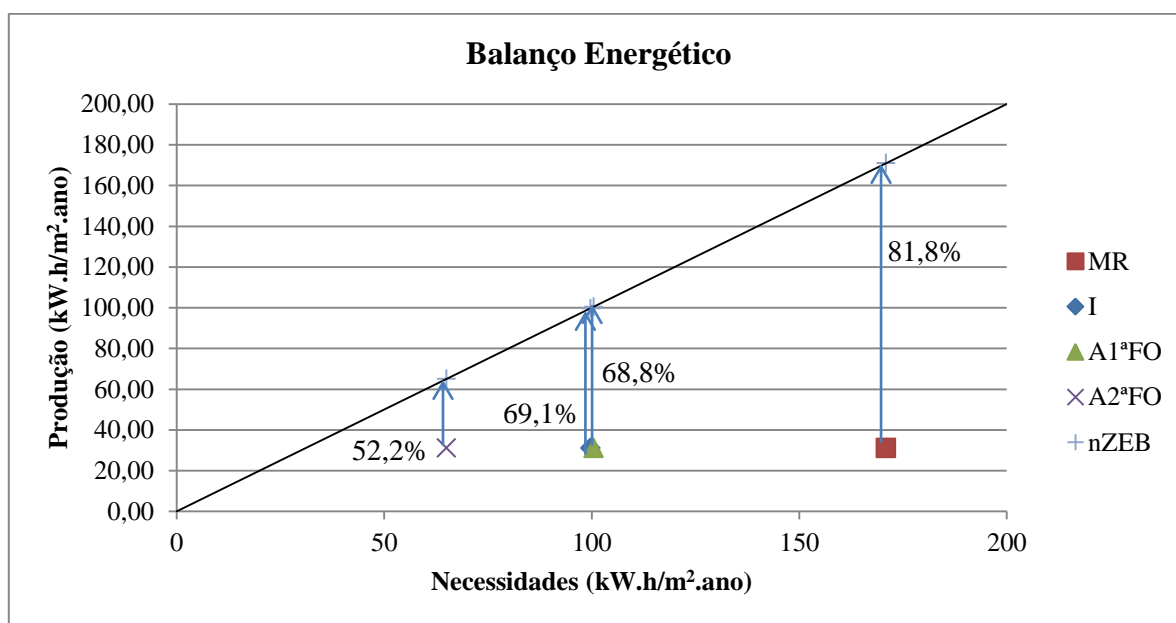
**Quadro 4.62** – Quadro síntese das necessidades totais da cidade do Porto e da energia solar mínimo regulamentar.

Necessidades	Energia Primária	Energia Final	kW.h/m <sup>2</sup> .ano
Máximo Regulamentar – MR	336,19	170,89	
Iniciais – I	167,97	99,66	
Após a 1ª Fase – A1ªFO	170,04	100,45	
Após a 2ª Fase (Final) – A2ªFO	77,87	65,00	
Esolar	31,06		

Com os dados presentes no Quadro 4.62 constata-se que as necessidades energéticas em energia primária são reduzidas em 76,84%, que em termos de valores absolutos representa menos 258,32 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas, em energia final as diminuições são de 61,96%, que equivale a menos 105,89 kWh/m<sup>2</sup>.ano de necessidades energéticas.



**Figura 4.24** - Gráfico de balanço energético para a cidade do Porto em energia primária.



**Figura 4.25** - Gráfico de balanço energético para a cidade de Porto em energia final.

Através da análise dos dados apresentados na Figura 4.24 constata-se que consegue-se diminuir a necessidade de produção energética de 90,8% para 60,1%, o que, em valores absolutos, significa que se conseguiu diminuir de 305,26 kWh/m².ano para 46,80 kWh/m².ano as necessidades de produção de energia. No caso do gráfico de balanço energético nulo desenhado em energia final (Figura 4.25) as necessidades de produção de energia diminuem de 81,8% para 52,2%, o que representa uma diminuição de 139,79 kWh/m².ano para 33,93 kWh/m².ano.



# CAPÍTULO 5 - Considerações Finais

## 5.1 Considerações finais

O trabalho da presente dissertação de mestrado foi realizado com o intuito de estudar soluções passivas que levassem à construção de uma moradia com baixas necessidades que, posteriormente, com o auxílio de soluções ativas, conseguiria atingir balanço energético nulo (*nZEB*).

A primeira fase do estudo realizado, relativa às soluções construtivas, mostrou ser pouco eficaz, pois produzia pequenas diminuições das necessidades, ou até mesmo aumentava-as, o que prova que ao não se considerar determinados parâmetros, caso das pontes térmicas, estão a realizar-se simulações sobre pressupostos erróneos, pois a moradia de referência não se encontra perto da realidade atual. Considera-se também que a escolha de soluções construtivas tradicionais não chega, devendo-se optar por também estudar soluções pouco habituais no território nacional, caso das paredes Trombe ou coberturas ajardinadas.

O grande contributo para a realização deste trabalho foi dado pelo programa *GenOpt*. Com o auxílio deste realizou-se a otimização das variáveis (azimute, dimensão horizontal dos envidraçados, existência de palas e respetiva dimensão, espessura dos isolamentos térmicos e renovações do ar interior). A segunda fase do trabalho revelou ser um grande sucesso, pois conseguiu-se obter grandes diminuições das necessidades energéticas.

Com a realização da terceira fase do estudo conseguiu-se responder ao primeiro objetivo do trabalho, concluindo-se que um dos grandes pontos de viragem na obtenção de edifícios de baixo consumo é a utilização de programas que funcionem com os mesmos pressupostos e objetivo comum do *GenOpt*.

A terceira fase do estudo permite também responder ao segundo objetivo estipulado para este estudo. Conclui-se que a diminuição das necessidades energéticas através das soluções estudadas, juntamente com a produção energética mínima obrigatória pela regulamentação portuguesa não é suficiente para se obter um edifício *nZEB* mas mostra que se está no caminho correto para se atingir esse desempenho.

Tendo em conta a tese de dissertação de Gonçalo Costa (2012), em que esta pretendia demonstrar que a integração de sistemas solares permite atingir as características de um *nZEB*, objetivo esse atingido com sucesso, pode-se afirmar que a união de sistemas de produção energética com as soluções otimizadas produzirão edifícios *nZEB*.

Em suma, conclui-se que a contribuição do estudo de soluções de otimização é bastante importante, pois permite elevadíssimas diminuições das necessidades energéticas o que garante que não seja necessário implementar sistemas de produção de energia eléctrica elaborados e complexos para se obter o estatuto de *nZEB*.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Este trabalho trata-se de um estudo inicial que pode vir a ser aprofundado, garantindo mais e melhores resultados na obtenção das necessidades energéticas mínimas, promovendo assim o aumento do número de edifícios do tipo *nZEB*.

Tendo o ponto anterior em conta, sugerem-se algumas alterações possíveis às características do estudo:

- Manter as características do estudo, acrescentando as pontes térmicas;
- Realização do mesmo estudo, mas considerando a existência de espaços não-úteis;
- Testar novos sistemas construtivos, como o caso de paredes Trombe e/ou coberturas ajardinadas;
- Estudar o impacto da aplicação de isolamento térmico no pavimento;
- Estudar o impacto provocado nas necessidades pela existência de palas verticais;
- Estudar uma moradia unifamiliar real, ou seja, estudar uma moradia existente;
- Estudar moradias plurifamiliares e prédios, garantindo o estudo dos fatores de forma.



# Bibliografia

- 1 - AELENEI, D. – *RCCTE "Light"*, Monte da Caparica, Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- 2 - AELENEI, L. *et al.* – *Design issues for net Zero-Energy Buildings*. Lisboa, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 2012.
- 3 - AELENEI, L. *et al.* – *Passive cooling approaches in net-zero energy solar buildings: Lessons learned from demonstration buildings*. Lisboa, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 2011.
- 4 - AELENEI, L. *et al.* – *The Road Towards “Zero-energy” in Buildings: Lessons Learned from SOLARXXI Building in Portugal*. Lisboa, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 2010. <http://hdl.handle.net/10400.9/950>
- 5 - AGÊNCIA PARA A ENERGIA (ADENE) – NT-SCE-01 – *Método de cálculo para a certificação energética de edifícios existentes no âmbito do RCCTE*. Algés, ADENE, 2009. [http://www.jesusferreira.com.pt/ficheiros\\_artigos/NT-SCE-01.pdf](http://www.jesusferreira.com.pt/ficheiros_artigos/NT-SCE-01.pdf)
- 6 - ATANASIU, B. – *Principles for nearly-zero-energy buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements*. Bruxelas, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Novembro 2011. [http://dl.dropbox.com/u/4399528/BPIE/publications/HR\\_nZEB%20study.pdf](http://dl.dropbox.com/u/4399528/BPIE/publications/HR_nZEB%20study.pdf)
- 7 - CONTI, J.; HOLTBER, P. – *International Energy Outlook 2011*. Washington, Independent Statistics and Analysis, U.S. Energy Information Administration, 2011. [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2011).pdf)
- 8 - COSTA, G. – *A contribuição dos sistemas solares térmicos e fotovoltaicos para o balanço energético dos edifícios residenciais unifamiliares*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2012.
- 9 - DECRETO-LEI nº38:382. D.R. 1ª Série nº 166 (1951-08-07) pags. 715-729. <http://dre.pt/pdf1sdip/1951/08/16601/07150729.pdf>
- 10 - DECRETO-LEI nº40/1990. D.R. 1ª Série nº 31 (1990-02-06) pags. 490-504. <http://dre.pt/pdf1sdip/1990/02/03100/04900504.pdf>
- 11 - DECRETO-LEI nº78/2006. D.R. 1ª Série nº 67 (2006-04-04) pags. 2411-2415 <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/04/067A00/24112415.pdf>
- 12 - DECRETO-LEI nº79/. D.R. 1ª Série nº 67 (2006-04-04) pags. 2416-2468 <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/04/067A00/24162468.pdf>

- 13 - DECRETO-LEI nº80/2006. D.R. 1ª Série-A nº 67 (2006-04-04) pags. 2468-2513. <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/04/067A00/24682513.pdf>
- 14 - DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT, SUSTAINABLE NEW HOMES – *The Road to Zero Carbon: Consultation on the Code for Sustainable Homes and the Energy Efficiency standard for Zero Carbon Homes*, Department for Communities and Local, Londres, 2009. <http://www.communities.gov.uk/documents/planningandbuilding/pdf/1415525.pdf>
- 15 - E.I.A. – *EnergyPlus Documentation*. Berkley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2010.
- 16 - ELLIS, P. *et al.* – *Automated Multivariate Optimization Tool for Energy Analysis*. Golden/Washington, National Renewable Energy Laboratory/United States Department of Energy, 2006. <http://www.nrel.gov/buildings/pdfs/40353.pdf>
- 17 - EnergyPlus V6-0, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/>, em Setembro de 2011.
- 18 - EnOB – *Research for Energy Optimization of Building*, <http://www.enob.info/en/new-buildings/project/details/energon-passive-office-building/>, em Agosto de 2012
- 19 - EUROPEAN COMMISSION – *Low Energy Buildings in Europe: Current State of Play, Definitions and Best practice*. Bruxelas, Setembro 2009. [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/buildings/info\\_note.pdf](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/buildings/info_note.pdf)
- 20 - EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF EUROPEAN UNION – *Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings (EPBD)*. Bruxelas, Dezembro 2002. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0065:EN:PDF>
- 21 - EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF EUROPEAN UNION – *Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (EPBD recast)*. Bruxelas, Maio 2010. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>
- 22 - EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF EUROPEAN UNION – *Implementing the Energy Performance Buildings Directive (EPBD) – Featuring Country Reports 2010*. Bruxelas, Abril 2011. [http://www.epbd-ca.org/Medias/Downloads/CA\\_Book\\_Implementing\\_the\\_EPBD\\_Featuring\\_Country\\_Reports\\_2010.pdf](http://www.epbd-ca.org/Medias/Downloads/CA_Book_Implementing_the_EPBD_Featuring_Country_Reports_2010.pdf)
- 23 - GenOpt 3.1, <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>, em Fevereiro de 2012
- 24 - Google SketchUp 8, <http://sketchup.google.com/intl/pt-BR/download/>, em Setembro de 2011
- 25 - GONÇALVES, H. – *Edifício Solar XXI: Um edifício energeticamente eficiente em Portugal*. Brochura de apresentação do Edifício Solar XXI, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Lisboa, 2005.

- 26 - GONÇALVES, H. – *Eficiência Energética*. Sumário da apresentação no âmbito da conferência Energia2020, FCUL, 8 e 9 de Fevereiro de 2010. [http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/docs/SumarioEficiencia%20Energetica\\_HelderGoncalves.pdf](http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/docs/SumarioEficiencia%20Energetica_HelderGoncalves.pdf)
- 27 - GONÇALVES, H. *et al.* – *Solar XXI: A portuguese office building towards Net Zero-Energy Building*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Lisboa 2012.
- 28 - HERKEL, S. – *Advances in housing renovation*. Apresentação no âmbito da Final Task 37 Seminar, São Francisco, 21 de Junho de 2010. [http://www.iea-shc.org/task37/events/exco67/4.Herkel-Concept\\_Analysis\\_and\\_Development.pdf](http://www.iea-shc.org/task37/events/exco67/4.Herkel-Concept_Analysis_and_Development.pdf)
- 29 - HOOKE, R.; JEEVES, A. – “Direct search” solution of numerical and statistical problems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 8(2):212–229, 1961.
- 30 - HOLST, J. – *Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption an indoor environment*. Eindhoven, IBPSA, 2003. [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03\\_0507\\_514.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_0507_514.pdf)
- 31 - INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – NP1037-1 - *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás, Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural*. Costa da Caparica, IPQ, 2002.
- 32 - KAPSALAKI, M.; LEAL, V. – *Recent Progress on net zero-energy buildings*. Porto, Instituto de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- 33 - KINGSPAN: Lighthouse – *Climate for change, zero carbon future*. <http://www.kingspanlighthouse.com/introduction.htm>, em Agosto de 2012.
- 34 - LAUSTSEN, J. – *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. Internacional Energy Agency, 2008. [http://www.iea.org/g8/2008/Building\\_Codes.pdf](http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf)
- 35 - MOITA, F. – *Energia Solar Passiva, 1*, Lisboa, Imprensa Nacional, 1987.
- 36 - BATCHGEO – *Net Zero-energy Buildings: worldwide*. <http://batchgeo.com/map/net-zero-energy-buildings>, em Agosto de 2012.
- 37 - PARKER, D. – *Very low energy homer in United States: Perspectives on performance from measured data*. Florida Solar Energy Center, University of Central Florida, Florida, 2009. <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-RR-302-08.pdf>
- 38 - PASSIVE-ON PROJECT – *A descrição longa do Passive-On*. Milão, Grupo de investigação Efficiency Research Group, Politécnico de Milão, Milão, 2007. <http://www.passive-on.org/CD/5.%20Long%20Description/Passive-On%20-%20Long%20Description%20-%20Portugues.pdf>

- 39 - PROJETO IDEAL-EPBD – *Projeto europeu sobre o comportamento dos consumidores face a certificação energética dos edifícios*. <http://www.ideal-epbd.eu/> em Maio de 2012
- 40 - RENOVABLES VERDES – *Casas Bioclimáticas (2). Ventilación Cruzada*. <http://www.renovablesverdes.com/casas-bioclimaticas-2-ventilacion-cruzada/> em Julho de 2012
- 41 - SANTOS, C.; MATIAS, L. – *Coeficientes de Transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios (ITE50)*. Lisboa, LNEC, 2006.
- 42 - TORCELLINI, P. *et al.* – *Zero-energy Buildings: A Critical Look at the Definition*. Artigo apresentado no ACEEE Summer Study, Pacific Grove, California, 14 a 18 de Agosto de 2006. <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>
- 43 - WALTON, G. – *Thermal Analysis Research Program User Manual Version 3.1.0*. NBSSIR 83-2655. National Bureau of Standards, 1983.
- 44 - WETTER, M. – *GenOpt (2011) Generic Optimization Program User Manual Version 3.1.0*. Berkley, University of California, 2011. <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/download/manual-3-1-0.pdf>
- 45 - WETTER, M.; POLAK, E. – *A Convergent Optimization Method Using Pattern search Algorithms with adaptive precision simulation*. Berkley, University of California, 2003. [http://www.inive.org/members\\_area/medias/pdf/inive/ibpsa/ufsc88.pdf](http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/inive/ibpsa/ufsc88.pdf)
- 46 - WETTER, M. – *Design Optimization with GenOpt (2011)*. Berkeley, University of California, 2000. <http://simulationresearch.lbl.gov/wetter/download/userNews-2000.pdf>
- 47 - YAZDANIAN, M.; KLEMS, J. – *Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings*. ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part 1, p. 1087. 1994

## **Anexo I**

### **Tabelas do GenOpt**



**BRAGANÇA**

Para a cidade de Bragança todas as simulações que ocorreram com o *GenOpt* encontram-se descritas no Quadro AI.1.

**Quadro AI.1** – Resultados das simulações realizadas através do *GenOpt*.

Simulation	Nt	Q_heat	Q_cool	azimuth	a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo	
1	1,38E+10	1,37E+10	1,20E+08	0	3,95	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Initial point.
25	1,27E+10	1,25E+10	1,48E+08	-10	4,05	9,65	2,95	6,55	1,15	9,4	12,4	1,15	0,08	0,15	1	1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Global search reduced cost.
49	1,05E+10	1,03E+10	2,11E+08	-10	4,25	9,65	3,15	6,35	0,95	9,2	12,2	0,95	0,08	0,15	1	1	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Global search reduced cost.
73	8,19E+09	7,90E+09	2,92E+08	-10	4,55	9,65	3,45	6,05	0,65	8,9	11,9	0,65	0,08	0,15	1,1	1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	Global search reduced cost.
96	8,05E+09	7,74E+09	3,12E+08	-10	4,65	9,65	3,55	5,95	0,55	8,8	11,8	0,55	0,08	0,15	1,2	1	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	Local search reduced cost.
119	7,81E+09	7,46E+09	3,46E+08	0	4,85	9,65	3,75	5,75	0,35	8,6	11,6	0,35	0,08	0,15	1,4	1	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	Global search reduced cost.
145	7,70E+09	7,34E+09	3,57E+08	0	4,95	9,65	3,85	5,65	0,25	8,5	11,5	0,25	0,08	0,15	1,5	1	0,5	1	1	1	0,8	1	0,8	1	0,8	Local search reduced cost.
174	7,63E+09	7,25E+09	3,78E+08	0	5,05	9,65	3,95	5,55	0,25	8,6	11,6	0,35	0,08	0,15	1,4	1	0,5	1	0,9	1	0,9	1	0,7	1	0,7	Local search reduced cost.
201	7,48E+09	7,08E+09	3,95E+08	0	5,25	9,65	4,15	5,35	0,15	8,7	11,8	0,55	0,08	0,15	1,4	1	0,5	1	0,8	1	0,9	1	0,5	1	0,5	Global search reduced cost.
218	7,30E+09	6,93E+09	3,70E+08	0	5,45	9,65	4,35	5,15	0,15	8,9	12,1	0,85	0,08	0,15	1,5	1	0,5	1	0,6	1	0,8	1	0,2	1	0,2	Global search reduced cost.
241	7,21E+09	6,86E+09	3,54E+08	0	5,55	9,65	4,45	5,05	0,25	9	12,2	0,95	0,08	0,15	1,6	1	0,5	1	0,5	1	0,7	1	0,1	1	0,1	Local search reduced cost.
260	7,04E+09	6,71E+09	3,31E+08	0	5,75	9,65	4,65	4,85	0,45	9,2	12,4	1,15	0,08	0,15	1,7	1	0,5	1	0,3	1	0,6	1	0	1	0	Global search reduced cost.
287	6,96E+09	6,64E+09	3,28E+08	0	5,85	9,65	4,75	4,75	0,55	9,3	12,5	1,25	0,08	0,15	1,7	1	0,5	1	0,2	1	0,5	1	0	1	0	Local search reduced cost.
311	6,90E+09	6,56E+09	3,36E+08	0	5,95	9,65	4,85	4,65	0,65	9,4	12,5	1,25	0,08	0,15	1,7	1	0,5	1	0,1	1	0,4	1	0	1	0	Local search reduced cost.
335	6,77E+09	6,43E+09	3,39E+08	0	6,15	9,65	5,05	4,45	0,85	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.
359	6,70E+09	6,36E+09	3,35E+08	0	6,25	9,65	5,15	4,35	0,95	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Local search reduced cost.
371	6,56E+09	6,24E+09	3,23E+08	0	6,45	9,65	5,35	4,15	1,15	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
395	6,49E+09	6,17E+09	3,14E+08	0	6,55	9,65	5,45	4,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
413	6,44E+09	6,11E+09	3,23E+08	0	6,65	9,65	5,55	3,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
444	6,34E+09	6,00E+09	3,35E+08	0	6,85	9,65	5,75	3,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,9	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
461	6,20E+09	5,84E+09	3,56E+08	0	7,15	9,65	6,05	3,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
486	6,03E+09	5,64E+09	3,89E+08	0	7,55	9,65	6,45	3,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
511	5,85E+09	5,42E+09	4,34E+08	0	8,05	9,65	6,95	2,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
551	5,67E+09	5,18E+09	4,91E+08	0	8,65	9,65	7,45	1,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
571	5,53E+09	4,98E+09	5,47E+08	0	9,25	9,65	7,95	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
595	5,50E+09	4,96E+09	5,39E+08	0	9,35	9,65	7,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,4	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
600	5,48E+09	4,95E+09	5,31E+08	0	9,45	9,65	7,75	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,5	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
620	5,43E+09	4,90E+09	5,32E+08	0	9,65	9,65	7,65	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,5	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
650	5,36E+09	4,82E+09	5,35E+08	0	9,95	9,65	7,45	1,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,4	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
677	5,27E+09	4,74E+09	5,31E+08	0	10,35	9,65	7,15	1,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,4	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
702	5,15E+09	4,63E+09	5,19E+08	0	10,85	9,65	6,75	1,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,4	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
721	5,13E+09	4,60E+09	5,25E+08	0	10,95	9,65	6,65	1,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
746	5,10E+09	4,59E+09	5,15E+08	0	11,05	9,65	6,45	1,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
760	5,10E+09	4,60E+09	4,93E+08	0	11,05	9,65	6,15	2,15	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
799	5,09E+09	4,63E+09	4,63E+08	0	11,05	9,65	5,75	2,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
826	5,09E+09	4,65E+09	4,42E+08	0	11,05	9,65	5,25	2,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
852	5,08E+09	4,67E+09	4,06E+08	-10	11,05	9,65	4,65	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
882	5,07E+09	4,67E+09	4,03E+08	-10	11,05	9,65	4,55	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Local search reduced cost.
910	5,07E+09	4,67E+09	3,99E+08	-10	11,05	9,65	4,45	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
930	5,07E+09	4,67E+09	3,97E+08	-10	11,05	9,65	4,25	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
963	5,06E+09	4,68E+09	3,85E+08	-10	11,05	9,65	3,95	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
977	5,06E+09	4,68E+09	3,82E+08	-10	11,05	9,65	3,85	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
998	5,06E+09	4,68E+09	3,78E+08	-10	11,05	9,65	3,75	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1027	5,05E+09	4,68E+09	3,69E+08	-10	11,05	9,65	3,55	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1063	5,05E+09	4,68E+09	3,64E+08	-10	11,05	9,65	3,25	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1089	5,04E+09	4,69E+09	3,51E+08	-10	11,05	9,65	2,85	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1104	5,04E+09	4,69E+09	3,53E+08	-10	11,05	9,65	2,95	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1104	5,04E+09	4,69E+09	3,53E+08	-10	11,05	9,65	2,95	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.

1139	5,04E+09	4,69E+09	3,54E+08	-10	11,05	9,65	2,9	2,8	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1170	5,04E+09	4,67E+09	3,65E+08	-15	11,05	9,65	2,9	2,7	1,25	9,45	12,5	1,2	0,08	0,15	2,05	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1197	5,03E+09	4,66E+09	3,71E+08	-15	11,05	9,65	2,9	2,55	1,25	9,35	12,5	1,2	0,08	0,15	2,05	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1224	5,02E+09	4,64E+09	3,76E+08	-15	11,05	9,65	2,9	2,35	1,25	9,3	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1239	5,00E+09	4,62E+09	3,83E+08	-15	11,05	9,65	2,9	2,15	1,25	9,25	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1265	4,98E+09	4,61E+09	3,79E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,9	1,25	9,25	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1285	4,96E+09	4,58E+09	3,87E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,6	1,25	9,3	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1322	4,96E+09	4,57E+09	3,92E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,55	1,25	9,35	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0,05	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1349	4,95E+09	4,56E+09	3,95E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,45	1,25	9,45	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0,05	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1374	4,95E+09	4,56E+09	3,95E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1374	4,95E+09	4,56E+09	3,95E+08	-20	11,05	9,65	2,9	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.
1403	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08	-17,5	11,05	9,65	2,875	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,15	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1459	4,95E+09	4,55E+09	3,94E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,475	1,25	0,08	0,15	2,125	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1488	4,95E+09	4,55E+09	3,94E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,125	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1488	4,95E+09	4,55E+09	3,94E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,125	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
1522	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1375	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1522	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1375	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
1522	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1375	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
1522	4,95E+09	4,55E+09	3,93E+08	-17,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1375	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Minimum point.



ÉVORA

Para a cidade de Évora todas as simulações que ocorreram com o *GenOpt* encontram-se descritas no Quadro AI.2.

Quadro AI.2 – Resultados das simulações realizadas através do *GenOpt*.

Simulation	Nt	Q_heat	Q_cool	azimuth	a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo	
1	9,76E+09	9,33E+09	4,30E+08	0	3,95	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,06	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Initial point.
25	8,30E+09	7,87E+09	4,29E+08	0	4,05	9,65	2,95	6,55	1,15	9,4	12,4	1,15	0,08	0,08	1,1	1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Global search reduced cost.
51	6,04E+09	5,59E+09	4,53E+08	0	4,25	9,65	3,15	6,35	0,95	9,2	12,2	0,95	0,08	0,12	1,3	1	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	Global search reduced cost.
63	4,39E+09	3,89E+09	5,06E+08	0	4,45	9,65	3,35	6,15	0,75	9	12	0,75	0,08	0,14	1,6	1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0	Global search reduced cost.
86	4,28E+09	3,75E+09	5,32E+08	0	4,55	9,65	3,45	6,05	0,65	8,9	11,9	0,65	0,08	0,14	1,7	1	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,7	0	Local search reduced cost.
112	4,08E+09	3,52E+09	5,58E+08	0	4,75	9,65	3,65	5,85	0,45	8,7	11,9	0,65	0,08	0,14	1,9	1	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0	Global search reduced cost.
136	3,91E+09	3,34E+09	5,69E+08	0	4,85	9,65	3,75	5,75	0,35	8,6	12	0,75	0,08	0,14	2	1	0,5	1	1	1	0,8	1	0	1	0	Local search reduced cost.
158	3,84E+09	3,27E+09	5,70E+08	0	4,95	9,65	3,85	5,65	0,35	8,7	12,1	0,85	0,08	0,14	2,1	1	0,5	1	0,9	1	0,7	1	0	1	0	Local search reduced cost.
183	3,69E+09	3,12E+09	5,68E+08	0	5,15	9,65	4,05	5,45	0,45	8,9	12,3	1,05	0,08	0,14	2,3	1	0,5	1	0,7	1	0,5	1	0	1	0	Global search reduced cost.
205	3,49E+09	2,93E+09	5,65E+08	0	5,45	9,65	4,35	5,15	0,65	9,2	12,5	1,25	0,08	0,14	2,6	1	0,5	1	0,4	1	0,3	1	0	1	0	Global search reduced cost.
231	3,44E+09	2,87E+09	5,69E+08	0	5,55	9,65	4,45	5,05	0,75	9,3	12,5	1,25	0,08	0,14	2,7	1	0,5	1	0,3	1	0,2	1	0	1	0	Local search reduced cost.
255	3,31E+09	2,75E+09	5,61E+08	0	5,75	9,65	4,65	4,85	0,95	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,9	1	0,5	1	0,1	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
277	3,24E+09	2,69E+09	5,51E+08	0	5,85	9,65	4,75	4,75	1,05	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,9	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
284	3,18E+09	2,63E+09	5,46E+08	0	5,95	9,65	4,85	4,65	1,15	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,9	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
305	3,07E+09	2,52E+09	5,56E+08	0	6,15	9,65	5,05	4,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
323	3,00E+09	2,41E+09	5,87E+08	0	6,35	9,65	5,25	4,25	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
347	2,89E+09	2,26E+09	6,29E+08	0	6,65	9,65	5,55	3,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	2,9	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
371	2,78E+09	2,09E+09	6,86E+08	0	7,05	9,65	5,95	3,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
388	2,66E+09	1,91E+09	7,46E+08	0	7,55	9,65	6,25	3,15	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
413	2,64E+09	1,89E+09	7,52E+08	0	7,65	9,65	6,15	3,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
450	2,60E+09	1,84E+09	7,62E+08	0	7,85	9,65	5,95	2,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
476	2,53E+09	1,77E+09	7,65E+08	-10	8,15	9,65	5,65	2,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
500	2,50E+09	1,71E+09	7,87E+08	-30	8,55	9,65	5,35	2,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
505	2,49E+09	1,68E+09	8,16E+08	-50	8,95	9,65	5,05	2,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
516	2,42E+09	1,57E+09	8,45E+08	-60	9,45	9,65	4,65	1,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
539	2,40E+09	1,54E+09	8,53E+08	-60	9,55	9,65	4,55	1,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
562	2,37E+09	1,50E+09	8,63E+08	-60	9,75	9,65	4,35	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
581	2,35E+09	1,48E+09	8,66E+08	-60	9,95	9,65	4,15	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
604	2,32E+09	1,45E+09	8,72E+08	-60	10,25	9,65	3,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
628	2,29E+09	1,41E+09	8,78E+08	-60	10,65	9,65	3,45	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
652	2,25E+09	1,37E+09	8,79E+08	-60	11,05	9,65	2,95	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
675	2,24E+09	1,37E+09	8,71E+08	-60	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
675	2,24E+09	1,37E+09	8,71E+08	-60	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.
709	2,15E+09	1,29E+09	8,65E+08	-55	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,45	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
709	2,15E+09	1,29E+09	8,65E+08	-55	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,45	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.

757	2,14E+09	1,28E+09	8,60E+08	-52,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,475	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
787	2,14E+09	1,28E+09	8,60E+08	-52,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
787	2,14E+09	1,28E+09	8,60E+08	-52,5	11,05	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
812	2,13E+09	1,27E+09	8,59E+08	-51,25	11,0375	9,65	2,8625	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
836	2,12E+09	1,26E+09	8,59E+08	-48,75	11,0125	9,65	2,8625	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
860	2,09E+09	1,25E+09	8,49E+08	-45	11	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
893	2,08E+09	1,23E+09	8,50E+08	-41,25	10,9875	9,65	2,85	1,45	1,25	9,5	12,5	1,2375	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Global search reduced cost.
918	2,05E+09	1,20E+09	8,43E+08	-36,25	10,9875	9,65	2,8625	1,45	1,25	9,5	12,5	1,2375	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Global search reduced cost.
941	2,01E+09	1,18E+09	8,28E+08	-30	11	9,65	2,8875	1,4625	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
954	2,00E+09	1,17E+09	8,27E+08	-28,75	11,0125	9,65	2,9	1,4625	1,25	9,5	12,4875	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
980	1,99E+09	1,16E+09	8,27E+08	-27,5	11,0375	9,65	2,9	1,475	1,25	9,5	12,4875	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1027	1,99E+09	1,16E+09	8,25E+08	-27,5	11,05	9,65	2,8875	1,4875	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1027	1,99E+09	1,16E+09	8,25E+08	-27,5	11,05	9,65	2,8875	1,4875	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
1057	1,98E+09	1,16E+09	8,24E+08	-26,875	11,05	9,65	2,88125	1,48125	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1083	1,98E+09	1,15E+09	8,21E+08	-25,625	11,05	9,65	2,86875	1,475	1,25	9,49375	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1108	1,97E+09	1,15E+09	8,19E+08	-23,75	11,05	9,65	2,85	1,475	1,25	9,49375	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1129	1,97E+09	1,15E+09	8,18E+08	-23,75	11,05	9,65	2,85	1,48125	1,25	9,49375	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1162	1,96E+09	1,15E+09	8,17E+08	-23,125	11,05	9,64375	2,85	1,4875	1,25	9,49375	12,5	1,25	0,08	0,15	3,31875	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1181	1,96E+09	1,15E+09	8,14E+08	-21,875	11,05	9,64375	2,85	1,5	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3125	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1200	1,96E+09	1,14E+09	8,14E+08	-20,625	11,05	9,64375	2,85	1,5125	1,25	9,5	12,5	1,24375	0,08	0,15	3,30625	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1230	1,96E+09	1,14E+09	8,13E+08	-19,375	11,05	9,65	2,85	1,53125	1,25	9,5	12,5	1,24375	0,08	0,15	3,30625	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1241	1,95E+09	1,14E+09	8,11E+08	-18,125	11,05	9,65	2,85	1,55	1,25	9,5	12,5	1,24375	0,08	0,15	3,30625	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1276	1,95E+09	1,14E+09	8,04E+08	-16,25	11,05	9,65	2,85	1,575	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3125	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1287	1,95E+09	1,15E+09	7,99E+08	-14,375	11,05	9,65	2,85	1,6	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,31875	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1287	1,95E+09	1,15E+09	7,99E+08	-14,375	11,05	9,65	2,85	1,6	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,31875	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
1287	1,95E+09	1,15E+09	7,99E+08	-14,375	11,05	9,65	2,85	1,6	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,31875	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Minimum point.

**FARO**

Para a cidade de Faro todas as simulações que ocorreram com o *GenOpt* encontram-se descritas no Quadro AI.3.

**Quadro AI.3** – Resultados das simulações realizadas através do *GenOpt*.

Simulation	Nt	Q_heat	Q_cool	azimuth	a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo		
1	5,93E+09	5,53E+09	3,97E+08	0	3,95	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,06	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Initial point.	
24	4,91E+09	4,54E+09	3,75E+08	0	4,05	9,55	2,95	6,55	1,15	9,4	12,4	1,15	0,08	0,08	1,1	1	0,9	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	Global search reduced cost.
49	3,33E+09	2,95E+09	3,77E+08	0	4,25	9,55	3,15	6,35	0,95	9,2	12,2	0,95	0,08	0,12	1,3	1	0,7	0,3	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0	0,3	0	Global search reduced cost.
61	2,22E+09	1,80E+09	4,22E+08	0	4,45	9,55	3,35	6,15	0,75	9	12	0,75	0,08	0,14	1,6	1	0,5	0,6	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0,6	0	Global search reduced cost.
86	2,14E+09	1,72E+09	4,26E+08	0	4,55	9,65	3,45	6,05	0,65	8,9	12,1	0,85	0,08	0,14	1,7	1	0,5	0,7	0	0,7	0,7	0,7	0,7	0	0,7	0	Local search reduced cost.
106	2,02E+09	1,59E+09	4,25E+08	0	4,65	9,65	3,65	5,85	0,45	8,7	12,3	1,05	0,08	0,14	1,9	1	0,5	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
131	1,89E+09	1,45E+09	4,42E+08	0	4,75	9,65	3,75	5,75	0,35	8,6	12,4	1,15	0,08	0,14	2	1	0,5	1	0	1	0,8	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
147	1,84E+09	1,40E+09	4,38E+08	0	4,85	9,65	3,85	5,65	0,45	8,7	12,5	1,25	0,08	0,14	2,1	1	0,5	1	0	1	0,8	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
177	1,80E+09	1,35E+09	4,49E+08	0	4,95	9,65	3,95	5,55	0,55	8,8	12,5	1,25	0,08	0,14	2,2	1	0,5	1	0	1	0,7	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
201	1,72E+09	1,26E+09	4,64E+08	0	5,15	9,65	4,15	5,35	0,75	9	12,5	1,25	0,08	0,14	2,4	1	0,5	1	0	1	0,5	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
225	1,58E+09	1,13E+09	4,57E+08	0	5,45	9,65	4,45	5,05	1,05	9,3	12,5	1,25	0,08	0,14	2,7	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
242	1,54E+09	1,09E+09	4,49E+08	0	5,55	9,65	4,55	4,95	1,15	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	2,8	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
273	1,46E+09	1,01E+09	4,50E+08	0	5,75	9,65	4,75	4,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
296	1,44E+09	9,77E+08	4,61E+08	0	5,85	9,65	4,85	4,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
301	1,41E+09	9,43E+08	4,71E+08	0	5,95	9,65	4,95	4,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
309	1,38E+09	8,90E+08	4,85E+08	0	6,15	9,65	5,05	4,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
332	1,34E+09	8,39E+08	5,05E+08	0	6,35	9,65	5,15	4,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
351	1,30E+09	7,83E+08	5,17E+08	0	6,65	9,65	5,15	4,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
375	1,24E+09	7,21E+08	5,21E+08	0	7,05	9,65	5,05	4,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
412	1,17E+09	6,55E+08	5,19E+08	0	7,55	9,65	4,85	4,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
437	1,10E+09	5,86E+08	5,10E+08	0	8,15	9,65	4,55	4,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
461	1,01E+09	5,15E+08	4,97E+08	0	8,85	9,65	4,15	5,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
466	9,19E+08	4,37E+08	4,82E+08	0	9,55	9,65	3,75	5,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
477	8,42E+08	3,75E+08	4,67E+08	0	10,35	9,65	3,25	6,25	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
513	8,30E+08	3,70E+08	4,61E+08	0	10,45	9,65	3,15	6,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
538	8,04E+08	3,55E+08	4,49E+08	0	10,65	9,65	2,95	6,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
561	7,92E+08	3,50E+08	4,43E+08	0	10,75	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
568	7,87E+08	3,40E+08	4,47E+08	0	10,85	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
592	7,79E+08	3,22E+08	4,57E+08	0	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
592	7,79E+08	3,22E+08	4,57E+08	0	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.	
634	7,53E+08	3,05E+08	4,48E+08	-5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0,05	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
634	7,53E+08	3,05E+08	4,48E+08	-5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0,05	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.	
689	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0,025	1	0	1	0	Global search reduced cost.	
722	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.	
722	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.	
722	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost.	

																										Reduce step size to '0.0625'.
775	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,49375	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
775	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,49375	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
775	7,51E+08	3,03E+08	4,48E+08	-2,5	11,05	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,49375	1,25	0,08	0,15	3,325	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Minimum point.

**LISBOA**

Para a cidade de Lisboa todas as simulações que ocorreram com o *GenOpt* encontram-se descritas no Quadro AI.4.

**Quadro AI.4** – Resultados das simulações realizadas através do GenOpt.

Simulation	Nt	Q_heat	Q_cool	azimuth	a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo	
1	8,04E+09	7,84E+09	1,95E+08	0	3,95	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,06	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Initial point.
24	6,72E+09	6,53E+09	1,96E+08	-10	4,05	9,65	2,95	6,55	1,15	9,4	12,4	1,15	0,08	0,08	1,1	1	0,9	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	Global search reduced cost.
48	4,70E+09	4,47E+09	2,30E+08	-10	4,25	9,65	3,15	6,35	0,95	9,2	12,2	0,95	0,08	0,12	1,3	1	0,7	0,3	0	0,3	0,3	0,3	0	0,3	0	Global search reduced cost.
60	3,23E+09	2,97E+09	2,65E+08	-10	4,45	9,65	3,35	6,15	0,75	9	12	0,75	0,08	0,14	1,6	1	0,5	0,6	0	0,6	0,6	0,6	0	0,6	0	Global search reduced cost.
84	3,12E+09	2,84E+09	2,84E+08	-10	4,55	9,65	3,45	6,05	0,65	8,9	12,1	0,65	0,08	0,14	1,7	1	0,5	0,7	0,1	0,7	0,7	0,7	0	0,7	0	Local search reduced cost.
109	2,93E+09	2,62E+09	3,16E+08	-10	4,75	9,65	3,65	5,85	0,45	8,7	12,3	0,65	0,08	0,14	1,9	1	0,5	0,9	0,3	0,9	0,9	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
133	2,78E+09	2,45E+09	3,28E+08	0	4,85	9,65	3,75	5,75	0,35	8,6	12,4	0,75	0,08	0,14	2	1	0,5	1	0,2	1	0,8	1	0	1	0	Local search reduced cost.
155	2,71E+09	2,38E+09	3,26E+08	0	4,95	9,65	3,85	5,65	0,45	8,7	12,5	0,85	0,08	0,14	2,1	1	0,5	1	0,1	1	0,7	1	0	1	0	Local search reduced cost.
170	2,62E+09	2,31E+09	3,06E+08	0	5,05	9,65	3,95	5,55	0,55	8,8	12,5	1,05	0,08	0,14	2,3	1	0,5	1	0	1	0,5	1	0	1	0	Global search reduced cost.
177	2,53E+09	2,24E+09	2,85E+08	0	5,15	9,65	4,05	5,45	0,65	8,9	12,5	1,25	0,08	0,14	2,5	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.
200	2,46E+09	2,18E+09	2,85E+08	-10	5,25	9,65	4,15	5,35	0,75	9	12,5	1,25	0,08	0,14	2,6	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Local search reduced cost.
219	2,34E+09	2,07E+09	2,73E+08	-10	5,45	9,65	4,25	5,15	0,95	9,2	12,5	1,25	0,08	0,14	2,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
230	2,22E+09	1,96E+09	2,59E+08	-10	5,65	9,65	4,35	4,95	1,15	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
247	2,15E+09	1,90E+09	2,40E+08	-10	5,75	9,65	4,45	4,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
270	2,10E+09	1,85E+09	2,48E+08	-10	5,85	9,65	4,55	4,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
287	2,02E+09	1,74E+09	2,72E+08	-10	6,05	9,65	4,75	4,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
305	1,94E+09	1,64E+09	3,05E+08	-10	6,25	9,65	4,95	4,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
322	1,85E+09	1,49E+09	3,59E+08	-10	6,55	9,65	5,25	4,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
347	1,76E+09	1,33E+09	4,27E+08	-10	6,95	9,65	5,55	3,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
372	1,67E+09	1,16E+09	5,03E+08	-10	7,45	9,65	5,75	3,15	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
395	1,59E+09	1,01E+09	5,83E+08	-10	8,05	9,65	5,85	2,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
434	1,52E+09	8,72E+08	6,48E+08	-10	8,75	9,65	5,85	2,25	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,9	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
460	1,45E+09	7,86E+08	6,68E+08	-10	9,55	9,65	5,75	1,95	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,7	0	0,9	0	1	0	Global search reduced cost.
487	1,38E+09	7,34E+08	6,49E+08	-10	10,45	9,65	5,55	1,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,4	0	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
507	1,37E+09	7,24E+08	6,42E+08	-10	10,55	9,65	5,45	1,85	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,3	0,1	0,9	0	0,9	0	Local search reduced cost.
523	1,33E+09	7,05E+08	6,25E+08	-10	10,75	9,65	5,25	2,05	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,2	0,2	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
563	1,28E+09	6,81E+08	5,95E+08	-10	11,05	9,65	4,95	2,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0,2	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
589	1,27E+09	6,82E+08	5,90E+08	-10	11,05	9,65	4,95	2,45	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0,1	0,9	0	0,9	0	Local search reduced cost.
616	1,27E+09	6,87E+08	5,80E+08	-10	11,05	9,65	4,95	2,65	1,25	9,2	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
624	1,26E+09	6,90E+08	5,70E+08	-10	11,05	9,65	4,95	2,85	1,25	9	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0	0,9	0	0,9	0	Global search reduced cost.
652	1,25E+09	6,62E+08	5,87E+08	-10	11,05	9,65	4,95	3,15	1,25	8,7	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	0,9	0	Global search reduced cost.
665	1,25E+09	6,64E+08	5,82E+08	-10	11,05	9,65	4,95	3,25	1,25	8,6	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	0,9	0	Local search reduced cost.
702	1,24E+09	6,68E+08	5,71E+08	-10	11,05	9,65	4,95	3,45	1,25	8,6	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0	1	0	0,9	0	Global search reduced cost.
729	1,23E+09	6,76E+08	5,52E+08	-10	11,05	9,65	4,95	3,75	1,25	8,7	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0	1	0	0,9	0	Global search reduced cost.
760	1,21E+09	6,45E+08	5,67E+08	-10	11,05	9,65	4,95	4,15	1,25	8,9	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
770	1,21E+09	6,49E+08	5,58E+08	-10	11,05	9,65	4,95	4,25	1,25	9	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
795	1,20E+09	6,57E+08	5,45E+08	-10	11,05	9,65	4,95	4,45	1,25	9,2	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.

820	1,19E+09	6,69E+08	5,25E+08	-10	11,05	9,65	4,95	4,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
842	1,19E+09	6,73E+08	5,17E+08	-10	11,05	9,65	4,95	4,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
867	1,18E+09	6,80E+08	5,03E+08	-10	11,05	9,65	4,95	5,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
894	1,18E+09	6,92E+08	4,83E+08	-10	11,05	9,65	4,95	5,35	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
920	1,17E+09	7,09E+08	4,59E+08	-10	11,05	9,65	4,95	5,75	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
955	1,15E+09	7,27E+08	4,26E+08	0	11,05	9,65	4,85	6,25	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
998	1,15E+09	7,36E+08	4,10E+08	0	11,05	9,65	4,75	6,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0,1	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1016	1,14E+09	7,46E+08	3,97E+08	0	11,05	9,65	4,65	6,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1032	1,13E+09	7,69E+08	3,65E+08	-10	11,05	9,65	4,45	6,55	1,25	9,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1071	1,12E+09	7,83E+08	3,42E+08	-10	11,05	9,65	4,15	6,55	1,25	9,2	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,2	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1095	1,11E+09	7,96E+08	3,17E+08	-10	11,05	9,65	3,75	6,45	1,25	8,9	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,4	0,4	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1119	1,10E+09	8,10E+08	2,94E+08	-10	11,05	9,65	3,25	6,25	1,25	8,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,7	0,7	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1145	1,10E+09	8,04E+08	2,99E+08	-10	11,05	9,65	3,25	6,15	1,25	8,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,7	0,6	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1161	1,10E+09	7,99E+08	3,04E+08	-10	11,05	9,65	3,25	6,05	1,25	8,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	0,8	0,4	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1186	1,10E+09	7,86E+08	3,13E+08	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	8,4	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1211	1,10E+09	7,86E+08	3,13E+08	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	8,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1216	1,10E+09	7,86E+08	3,13E+08	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	8,6	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1231	1,10E+09	7,86E+08	3,13E+08	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	8,8	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1257	1,10E+09	7,86E+08	3,13E+08	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	9,1	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1283	1099109474	786213554,9	312895919	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1283	1099109474	786213554,9	312895919	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,14	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.
1322	1058827169	744965415,9	313861753,3	-10	11,05	9,65	3,25	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1338	1057365077	747645724	309719352,9	-10	11,05	9,65	3,2	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
1338	1057365077	747645724	309719352,9	-10	11,05	9,65	3,2	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.
1338	1057365077	747645724	309719352,9	-10	11,05	9,65	3,2	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
1418	1057196344	748303902	308892441,5	-10	11,05	9,65	3,2	5,8625	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1418	1057196344	748303902	308892441,5	-10	11,05	9,65	3,2	5,8625	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
1475	1057097194	747974398	309122795,6	-10	11,05	9,65	3,2	5,85625	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1499	1056928773	747981685,5	308947087,1	-10	11,05	9,65	3,19375	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1499	1056928773	747981685,5	308947087,1	-10	11,05	9,65	3,19375	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
1499	1056928773	747981685,5	308947087,1	-10	11,05	9,65	3,19375	5,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	3,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Minimum point.

**PORTO**

Para a cidade do Porto todas as simulações que ocorreram com o *GenOpt* encontram-se descritas no Quadro AI.5.

**Quadro AI. 5** – Resultados das simulações realizadas através do GenOpt.

Simulation	Nt	Q_heat	Q_cool	azimuth	a	b	c	e	d	f	g	h	ep	ec	rphv	rphvd	rphi	sis	svs	sin	svn	sie	sve	sio	svo	
1	8,41E+09	8,41E+09	14077,28517	0	3,95	9,65	2,85	6,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Initial point.
24	7,54E+09	7,54E+09	802684,4561	10	4,05	9,55	2,95	6,55	1,15	9,4	12,4	1,15	0,08	0,15	1	1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Global search reduced cost.
48	5,91E+09	5,91E+09	7725678,346	10	4,25	9,35	3,15	6,35	0,95	9,2	12,2	0,95	0,08	0,15	1,1	1	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Global search reduced cost.
71	4,27E+09	4,25E+09	2,18E+07	0	4,55	9,05	3,45	6,05	0,65	8,9	11,9	0,65	0,08	0,15	1,3	1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	Global search reduced cost.
94	4,14E+09	4,12E+09	2,68E+07	0	4,65	8,95	3,55	5,95	0,55	8,8	11,8	0,55	0,08	0,15	1,4	1	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	Local search reduced cost.
118	3,91E+09	3,88E+09	3,75E+07	0	4,85	8,75	3,75	5,75	0,35	8,6	11,6	0,35	0,08	0,15	1,6	1	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	Global search reduced cost.
144	3,82E+09	3,78E+09	4,17E+07	0	4,95	8,65	3,85	5,65	0,25	8,5	11,5	0,25	0,08	0,15	1,7	1	0,5	1	1	1	0,8	1	0,8	1	0,8	Local search reduced cost.
171	3,75E+09	3,71E+09	4,49E+07	0	5,05	8,55	3,95	5,55	0,25	8,6	11,6	0,35	0,08	0,15	1,8	1	0,5	1	0,9	1	0,7	1	0,7	1	0,7	Local search reduced cost.
197	3,62E+09	3,57E+09	5,10E+07	0	5,25	8,35	4,15	5,35	0,35	8,8	11,8	0,55	0,08	0,15	1,9	1	0,5	1	0,7	1	0,5	1	0,5	1	0,5	Global search reduced cost.
224	3,43E+09	3,38E+09	4,85E+07	0	5,55	8,25	4,45	5,05	0,55	9,1	12,1	0,85	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0,4	1	0,3	1	0,2	1	0,2	Global search reduced cost.
248	3,36E+09	3,32E+09	4,25E+07	0	5,65	8,35	4,55	4,95	0,65	9,2	12,2	0,95	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0,3	1	0,2	1	0,1	1	0,1	Local search reduced cost.
269	3,23E+09	3,20E+09	3,11E+07	0	5,85	8,55	4,75	4,75	0,85	9,4	12,4	1,15	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0,1	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
291	3,17E+09	3,14E+09	2,60E+07	0	5,95	8,65	4,85	4,65	0,95	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
304	3,11E+09	3,09E+09	2,43E+07	0	6,05	8,75	4,95	4,55	1,05	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
336	3,00E+09	2,98E+09	2,15E+07	0	6,25	8,95	5,15	4,35	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	1,9	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
360	2,95E+09	2,93E+09	2,17E+07	0	6,35	9,05	5,25	4,25	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
385	2,85E+09	2,83E+09	2,45E+07	0	6,55	9,25	5,45	4,05	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
410	2,71E+09	2,68E+09	2,76E+07	0	6,85	9,55	5,75	3,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,1	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
433	2,66E+09	2,64E+09	2,77E+07	0	6,95	9,65	5,85	3,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
454	2,61E+09	2,58E+09	3,15E+07	0	7,05	9,65	6,05	3,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,2	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
479	2,52E+09	2,48E+09	3,64E+07	0	7,25	9,65	6,35	3,15	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,3	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
496	2,40E+09	2,35E+09	4,64E+07	0	7,55	9,65	6,75	2,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,4	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
528	2,27E+09	2,21E+09	5,98E+07	0	7,95	9,65	7,25	2,25	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
553	2,13E+09	2,05E+09	8,44E+07	0	8,45	9,65	7,85	1,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
576	2,11E+09	2,02E+09	9,12E+07	0	8,55	9,65	7,95	1,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
601	2,07E+09	1,97E+09	9,77E+07	0	8,75	9,65	8,05	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
624	2,05E+09	1,95E+09	9,63E+07	0	8,85	9,65	8,05	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
655	2,01E+09	1,91E+09	9,69E+07	0	9,05	9,65	8,05	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,8	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
674	1,96E+09	1,86E+09	1,01E+08	0	9,35	9,65	8,05	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,8	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.
706	1,89E+09	1,78E+09	1,12E+08	0	9,75	9,65	8,05	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0,2	1	0	1	0	Global search reduced cost.
731	1,82E+09	1,70E+09	1,18E+08	0	10,25	9,65	7,95	1,45	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0,1	1	0	1	0	Global search reduced cost.
742	1,73E+09	1,61E+09	1,24E+08	0	10,85	9,65	7,75	1,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
774	1,71E+09	1,59E+09	1,20E+08	0	10,95	9,65	7,65	1,55	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
799	1,70E+09	1,58E+09	1,16E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,65	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,8	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
821	1,70E+09	1,59E+09	1,10E+08	0	11,05	9,65	7,15	1,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
863	1,70E+09	1,59E+09	1,12E+08	0	11,05	9,65	7,25	1,75	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,7	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Local search reduced cost.
896	1,70E+09	1,58E+09	1,16E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.

896	1,70E+09	1,58E+09	1,16E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,85	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.5'.
962	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,65	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
962	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,65	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.25'.
962	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	0	11,05	9,65	7,45	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,65	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.125'.
1054	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	0	11,05	9,65	7,4625	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6625	1	0,5	1	0	1	0	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1085	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	1,25	11,05	9,65	7,4875	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6875	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Global search reduced cost.
1085	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	1,25	11,05	9,65	7,4875	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6875	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Reduce step size to '0.0625'.
1085	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	1,25	11,05	9,65	7,4875	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6875	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Iteration step did not reduce cost. Maximum number of step reductions reached.
1085	1,70E+09	1,59E+09	1,13E+08	1,25	11,05	9,65	7,4875	1,9	1,25	9,5	12,5	1,25	0,08	0,15	2,6875	1	0,5	1	0	1	0,0125	1	0	1	0	Minimum point.